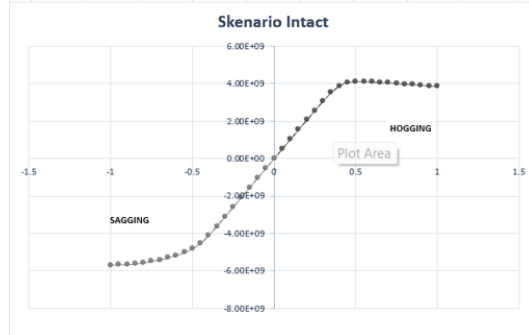


BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kondisi *Intact*

Tahap awal penelitian dilakukan dengan mensimulasikan kondisi utuh (*intact condition*) menggunakan metode elemen hingga dengan $\Delta V = 0$ untuk memperoleh data acuan terhadap kekuatan *ultimate strength* pada bagian *double bottom* kapal *bulk carrier*. Berdasarkan pada gambar 4.1, diperoleh momen terbesar sebesar $4,1 \times 10^9$ Nm pada kondisi hogging dan $5,6 \times 10^9$ Nm pada kondisi sagging.



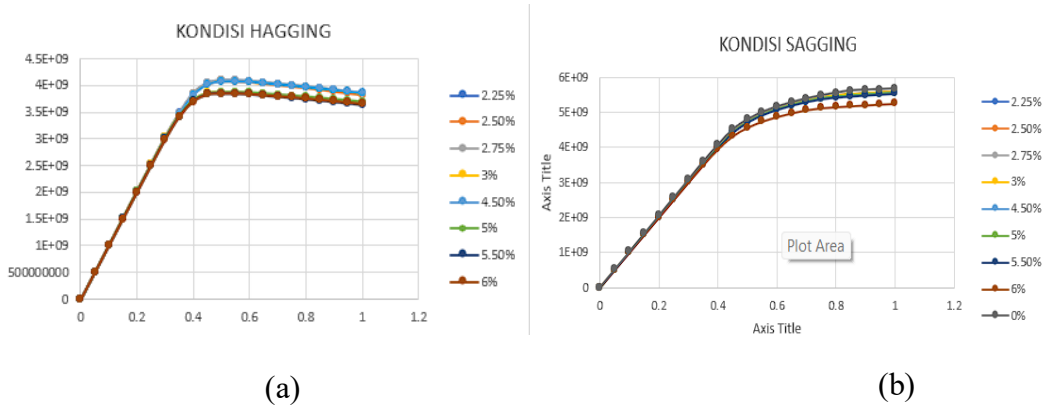
Gambar 4.1 Kondisi *intact* (Sumber: penulis 2026)

4.2 Skenario: *Double Bottom*

Korosi pada struktur *double bottom* menyebabkan berkurangnya ketebalan pelat dan elemen penegar sehingga kapasitas struktur dalam menahan beban lentur mengalami penurunan. Semakin tinggi tingkat korosi yang terjadi, semakin besar pula pengurangan luas penampang efektif yang berkontribusi terhadap kekuatan memanjang kapal. Kondisi ini berdampak langsung pada penurunan *ultimate strength* struktur, yang ditunjukkan oleh berkurangnya nilai *ultimate bending moment* baik pada kondisi hogging maupun sagging. Dengan menurunnya *ultimate strength*, kemampuan *double bottom* untuk menahan beban maksimum sebelum mengalami kegagalan plastis menjadi lebih rendah dibandingkan kondisi utuh (*intact*). Oleh karena itu, korosi pada *double bottom* merupakan salah satu faktor penting yang perlu diperhitungkan dalam evaluasi integritas dan umur layan struktur kapal *bulk carrier*.

Berdasarkan kurva bending moment–curvature pada kondisi sagging dan hogging, terlihat bahwa nilai momen lentur meningkat seiring bertambahnya kurvatur hingga mencapai kapasitas terbesar struktur. Pada tahap awal pembebanan, seluruh variasi tingkat korosi menunjukkan respons yang hampir identik dan cenderung linier, yang menandakan bahwa struktur masih berada dalam daerah elastis. Seiring meningkatnya kurvatur, perbedaan kapasitas struktur akibat variasi korosi mulai terlihat. Pada kondisi sagging, model utuh (*intact*) dengan $\Delta V = 0\%$ menghasilkan *ultimate bending moment* tertinggi, yaitu sekitar $5,6 \times 10^9$ Nm, sedangkan peningkatan tingkat korosi menyebabkan penurunan kapasitas momen terbesar secara bertahap. Sementara itu, pada kondisi hogging, nilai momen terbesar tertinggi diperoleh pada tingkat korosi 2,25%, yaitu sekitar $4,0 \times 10^9$ Nm, dan menurun hingga sekitar $3,8 \times 10^9$ Nm pada tingkat korosi 6%. Setelah mencapai nilai maksimum, kurva hogging menunjukkan kecenderungan menurun yang mengindikasikan terjadinya deformasi plastis dan penurunan kekakuan struktur. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan tingkat

pitting corrosion pada struktur *double bottom* menyebabkan berkurangnya ketebalan material dan luas penampang efektif yang berperan dalam menahan beban memanjang kapal. Akibatnya, *ultimate strength* struktur mengalami penurunan, sehingga kemampuan *double bottom* dalam menahan beban lentur maksimum, baik pada kondisi *sagging* maupun *hogging*, menjadi lebih rendah dibandingkan kondisi dengan tingkat korosi yang lebih kecil atau kondisi utuh.



Gambar 4. 2 Grafik momen lentur vs kelengkungan berbagai variasi *volume* korosi (ΔV): (a) kondisi *hogging*, (b) kondisi *shagging* (Sumber; Penulis 2026)

4.3 Kondisi *Hogging*

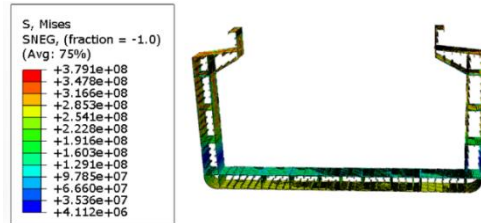
Berdasarkan hasil distribusi tegangan von Mises pada model *double bottom* terlihat bahwa tegangan tidak terdistribusi secara merata pada seluruh struktur. Konsentrasi tegangan tertinggi ditunjukkan oleh area berwarna kuning hingga merah dengan nilai maksimum. Tegangan tinggi terutama terkonsentrasi pada bagian sudut pertemuan antara pelat alas (*bottom plate*), pelat sisi (*side girder*), dan elemen penegar, yang merupakan daerah dengan perubahan geometri dan jalur aliran gaya yang kompleks. Sementara itu, sebagian besar area struktur menunjukkan distribusi tegangan pada rentang menengah yang ditandai dengan warna hijau hingga sian, sedangkan daerah berwarna biru menunjukkan tegangan yang relatif rendah. Pola distribusi ini mengindikasikan bahwa beban lentur yang bekerja menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan pada elemen-elemen struktural tertentu yang berpotensi menjadi lokasi awal terjadinya deformasi plastis. Selain itu, keberadaan korosi mengurangi ketebalan efektif material sehingga meningkatkan tingkat tegangan pada area yang mengalami degradasi, yang pada akhirnya dapat menurunkan kapasitas *ultimate strength* struktur *double bottom* secara keseluruhan.

4.3.1 Kondisi 0%

Berdasarkan hasil distribusi tegangan von Mises pada model penampang kapal kondisi *hogging* tanpa korosi (DOP 0%), terlihat bahwa tegangan tidak terdistribusi secara merata pada seluruh struktur. Nilai tegangan maksimum yang diperoleh mencapai $3,79 \times 10^8$ Pa (379 MPa), yang ditunjukkan oleh warna kuning hingga merah pada beberapa area struktur. Konsentrasi tegangan terutama terjadi pada daerah *hard corner* atau pertemuan antara pelat alas (*bottom plating*) dengan *web frame* serta pada sambungan antara pelat dan

penegar. Kondisi ini menunjukkan bahwa area tersebut menjadi lokasi kritis yang menerima beban terbesar akibat momen lentur hogging.

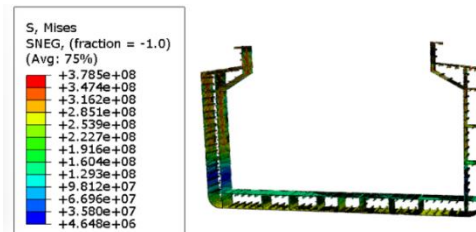
Pada kondisi hogging, bagian deck mengalami tegangan tarik, sedangkan bagian bottom mengalami tegangan tekan. Distribusi tegangan yang terlihat pada model menunjukkan bahwa sebagian besar elemen struktur masih berada pada rentang tegangan menengah (warna hijau hingga biru muda), sehingga mampu berkontribusi dalam menahan beban lentur yang bekerja. Namun demikian, adanya peningkatan tegangan pada daerah sudut dan sambungan struktur mengindikasikan terjadinya konsentrasi tegangan akibat perubahan geometri dan kekakuan lokal.



Gambar 4.3 Kontur tegangan pada skenario *double bottom* pada kondisi *hogging* untuk *volume* korosi (ΔV): 0%,

4.3.2 Kondisi 2.25%

Berdasarkan hasil simulasi distribusi tegangan von Mises pada kondisi hogging dengan tingkat korosi 2,25%, terlihat bahwa pola distribusi tegangan



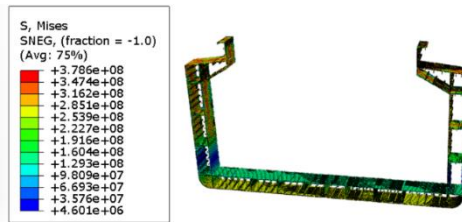
Gambar 4.4 Kontur tegangan pada skenario *double bottom* pada kondisi *hogging* untuk *volume* korosi (ΔV): 2.25%,

masih relatif serupa dengan kondisi utuh, namun terjadi perubahan pada penyebaran tegangan di beberapa bagian struktur akibat berkurangnya ketebalan elemen karena korosi. Nilai tegangan maksimum yang diperoleh mencapai $3,785 \times 10^8$ Pa (378,5 MPa), yang menunjukkan bahwa struktur masih mengalami konsentrasi tegangan pada daerah sambungan antara pelat dan penegar serta pada area sudut (*hard corner*) di bagian bilga dan web frame. Distribusi tegangan menunjukkan bahwa sebagian besar tegangan terkonsentrasi pada elemen-elemen struktur yang berfungsi sebagai jalur utama penyaluran beban lentur. Pada kondisi hogging, pelat geladak mengalami tegangan tarik, sedangkan bagian dasar kapal (*bottom structure*) mengalami tegangan tekan. Adanya pengurangan ketebalan akibat korosi menyebabkan luas penampang efektif berkurang sehingga kemampuan struktur dalam mendistribusikan beban menjadi sedikit menurun. Kondisi ini ditunjukkan oleh meningkatnya area dengan tingkat tegangan menengah.

4.3.3 Kondisi 2.50%

Berdasarkan hasil simulasi distribusi tegangan von Mises pada kondisi hogging dengan tingkat korosi 2,50%, terlihat bahwa tegangan masih terdistribusi pada seluruh elemen struktur double bottom, namun dengan pola konsentrasi yang semakin jelas pada daerah-daerah kritis. Nilai tegangan maksimum yang diperoleh sebesar $3,786 \times 10^8$ Pa (378,6 MPa). Tegangan tertinggi terkonsentrasi pada area sambungan antara pelat alas (bottom plating) dengan web frame serta pada bagian sudut bilga (hard corner), yang merupakan lokasi dengan perubahan geometri dan kekakuan struktur sehingga rentan mengalami konsentrasi tegangan.

Pada kondisi hogging, bagian dasar struktur menerima tegangan tekan yang relatif besar akibat momen lentur yang bekerja. Hal ini terlihat dari dominasi warna hijau hingga kuning pada pelat alas dan beberapa elemen penegar memanjang. Sementara itu, bagian web frame menunjukkan variasi distribusi tegangan yang ditandai dengan gradasi warna biru hingga hijau, yang mengindikasikan bahwa elemen tersebut berperan dalam menyalurkan beban dari pelat menuju struktur utama. Berkurangnya ketebalan akibat korosi menyebabkan luas penampang efektif menurun sehingga kemampuan struktur dalam menahan beban juga mengalami penurunan.

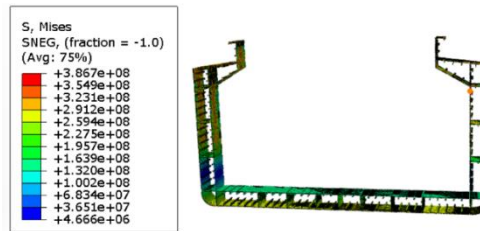


Gambar 4.5 Kontur tegangan pada skenario *double bottom* pada kondisi *hogging* untuk volume korosi (ΔV): 2.50%,

4.3.4 Kondisi 2.75%

Berdasarkan hasil simulasi distribusi tegangan von Mises pada kondisi hogging dengan tingkat korosi 2,75%, diperoleh nilai tegangan maksimum sebesar $3,867 \times 10^8$ Pa (386,7 MPa). Nilai ini menunjukkan peningkatan dibandingkan dengan kondisi korosi yang lebih rendah, yang mengindikasikan bahwa pengurangan ketebalan struktur akibat korosi mulai memberikan pengaruh yang lebih signifikan terhadap respons struktur. Distribusi tegangan masih terkonsentrasi pada daerah-daerah kritis, terutama pada sambungan antara pelat alas (bottom plating) dengan web frame, area bilga (hard corner), serta pada beberapa bagian penegar yang berfungsi sebagai jalur utama penyaluran beban.

Pola distribusi tegangan menunjukkan bahwa sebagian besar elemen struktur mengalami tegangan pada rentang menengah hingga tinggi yang ditunjukkan oleh warna hijau hingga kuning. Pada kondisi hogging, pelat dasar kapal menerima tegangan tekan yang dominan, sedangkan elemen struktur di bagian atas mengalami tegangan tarik. Berkurangnya luas penampang efektif akibat korosi menyebabkan beban yang sama harus ditahan oleh area penampang yang lebih kecil, sehingga terjadi peningkatan konsentrasi tegangan pada beberapa lokasi tertentu. Kondisi ini terlihat dari semakin luasnya area dengan tingkat tegangan yang relatif tinggi dibandingkan model dengan tingkat korosi yang lebih rendah.



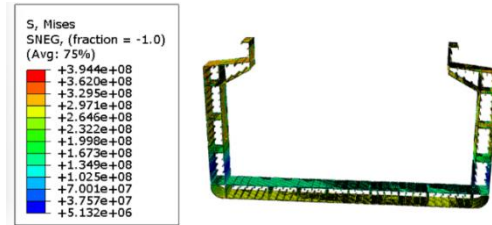
Gambar 4.6 Kontur tegangan pada skenario *double bottom* pada kondisi *hogging* untuk volume korosi (ΔV): 2.75%,

4.3.5 Kondisi 3%

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA), distribusi tegangan Von Mises pada penampang kapal dengan tingkat *uniform corrosion* sebesar 3% pada kondisi *hogging* menunjukkan pola penyebaran tegangan yang tidak merata. Nilai tegangan maksimum yang diperoleh mencapai $3,94 \times 10^8$ Pa dan terkonsentrasi pada area sambungan antara pelat dasar, sisi kapal, serta elemen pengaku (*stiffener*). Konsentrasi tegangan pada daerah tersebut mengindikasikan adanya lokasi kritis yang mengalami beban struktural lebih besar dibandingkan bagian lainnya. Sementara itu, sebagian besar area struktur berada pada rentang tegangan menengah yang ditunjukkan oleh warna hijau hingga kuning, menandakan bahwa struktur masih mampu mendistribusikan beban meskipun telah mengalami penurunan ketebalan akibat korosi.

Kondisi *hogging* menyebabkan pelat dasar dan elemen struktur di sekitarnya menerima tegangan yang lebih tinggi akibat pengaruh momen lentur memanjang kapal. Pengurangan ketebalan sebesar 3% akibat korosi seragam mengakibatkan berkurangnya luas penampang efektif dan kekakuan struktur, sehingga tegangan yang timbul menjadi lebih besar dibandingkan kondisi tanpa korosi. Nilai tegangan maksimum yang mendekati atau bahkan melampaui tegangan leleh baja kapal menunjukkan adanya potensi terjadinya deformasi plastis pada area tertentu. Oleh karena itu, hasil simulasi ini menunjukkan bahwa korosi seragam meskipun dalam persentase yang relatif kecil tetap memberikan

pengaruh signifikan terhadap perilaku struktur dan berkontribusi terhadap penurunan *ultimate strength* penampang kapal pada kondisi *hogging*.

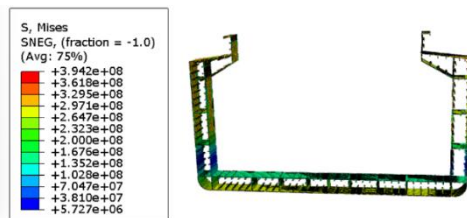


Gambar 4.7 Kontur tegangan pada skenario *double bottom* pada kondisi *hogging* untuk *volume* korosi (ΔV): 3%,

4.3.6 Kondisi 4.50%

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA), distribusi tegangan Von Mises pada penampang kapal dengan uniform corrosion sebesar 4,5% pada kondisi *hogging* menunjukkan bahwa tegangan masih terdistribusi pada seluruh elemen utama struktur, namun dengan konsentrasi yang lebih tinggi pada daerah sambungan antara pelat dasar (*bottom plating*), sisi kapal (*side shell*), dan elemen pengaku (*stiffener*). Nilai tegangan maksimum yang diperoleh mencapai $3,94 \times 10^8$ Pa (394 MPa), sedangkan tegangan minimum sebesar $5,73 \times 10^6$ Pa. Daerah yang ditunjukkan oleh warna kuning hingga merah mengindikasikan area kritis yang mengalami tegangan tinggi akibat pengaruh momen lentur memanjang pada kondisi *hogging*. Konsentrasi tegangan pada area transisi geometri dan sambungan struktur menunjukkan adanya ketidakseragaman distribusi beban yang berpotensi menjadi lokasi awal terjadinya deformasi atau kegagalan lokal.

Peningkatan tingkat korosi menjadi 4,5% menyebabkan berkurangnya ketebalan efektif elemen struktur sehingga kekakuan dan kapasitas penampang dalam menahan beban semakin menurun. Kondisi ini mengakibatkan tegangan yang bekerja pada struktur menjadi lebih besar karena beban yang sama harus ditahan oleh luas penampang yang lebih kecil. Nilai tegangan maksimum yang mendekati atau melampaui tegangan leleh baja kapal menunjukkan bahwa sebagian area struktur telah berada pada kondisi kritis dan berpotensi mengalami deformasi plastis. Hasil simulasi ini mengindikasikan bahwa peningkatan tingkat korosi memberikan pengaruh signifikan terhadap perilaku struktur kapal, ditandai dengan meningkatnya konsentrasi tegangan pada daerah-daerah kritis yang pada akhirnya dapat menyebabkan penurunan *ultimate strength* dan menurunkan tingkat keamanan struktur kapal saat menerima beban lentur *hogging*.

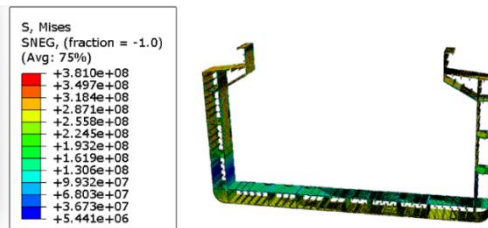


Gambar 4.8 Kontur tegangan pada skenario *double bottom* pada kondisi *hogging* untuk *volume* korosi (ΔV): 4.50%,

4.3.7 Kondisi 5%

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA), distribusi tegangan Von Mises pada penampang kapal dengan tingkat uniform corrosion sebesar 5% pada kondisi hogging menunjukkan bahwa tegangan maksimum yang terjadi mencapai $3,81 \times 10^8$ Pa (381 MPa), sedangkan tegangan minimum sebesar $5,44 \times 10^6$ Pa. Distribusi tegangan terlihat terkonsentrasi pada area sambungan antara pelat dasar (bottom plating), sisi kapal (side shell), serta elemen pengaku (stiffener) yang ditunjukkan oleh dominasi warna kuning hingga oranye. Konsentrasi tegangan pada daerah tersebut menunjukkan bahwa area tersebut berperan sebagai lokasi kritis dalam menahan beban lentur memanjang akibat kondisi hogging. Selain itu, perubahan warna yang cukup signifikan pada daerah sudut bawah (bilge area) mengindikasikan adanya peningkatan respons tegangan akibat kombinasi pengaruh geometri struktur dan penurunan ketebalan elemen karena korosi.

Peningkatan tingkat korosi hingga 5% menyebabkan berkurangnya luas penampang efektif dan menurunnya kekakuan struktur, sehingga kemampuan struktur dalam mendistribusikan beban menjadi semakin terbatas. Meskipun nilai tegangan maksimum pada model ini sedikit lebih rendah dibandingkan variasi korosi sebelumnya, nilai tersebut masih berada pada kisaran yang mendekati atau melampaui tegangan leleh baja kapal konvensional. Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur telah memasuki fase kritis yang berpotensi mengalami deformasi plastis lokal apabila pembebanan terus meningkat. Dengan demikian, hasil simulasi menunjukkan bahwa korosi seragam sebesar 5% memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perilaku kekuatan struktur kapal, terutama dalam meningkatkan kerentanan terhadap konsentrasi tegangan dan menurunkan ultimate strength penampang pada kondisi hogging. Hasil ini memperkuat indikasi bahwa degradasi ketebalan akibat korosi merupakan faktor penting yang harus diperhitungkan dalam evaluasi integritas dan umur layan struktur kapal.



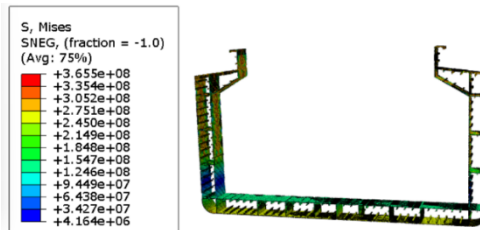
Gambar 4.9 Kontur tegangan pada skenario *double bottom* pada kondisi *hogging* untuk *volume* korosi (ΔV): 5%,

4.3.8 Kondisi 5.50%

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA), distribusi tegangan Von Mises pada penampang kapal dengan tingkat uniform corrosion sebesar 5,5% pada kondisi hogging menunjukkan nilai tegangan maksimum sebesar $3,66 \times 10^8$ Pa (365,5 MPa) dan tegangan minimum sebesar $4,16 \times 10^6$ Pa. Distribusi tegangan masih terkonsentrasi pada area kritis, yaitu sambungan antara pelat dasar (bottom plating), sisi kapal (side shell), dan elemen pengaku (stiffener), yang ditunjukkan oleh dominasi warna kuning hingga oranye. Sementara itu, daerah dengan tegangan lebih rendah ditunjukkan oleh warna biru hingga hijau yang umumnya

berada pada bagian web sisi kapal. Pola distribusi ini menunjukkan bahwa beban lentur memanjang akibat kondisi hogging tidak terdistribusi secara seragam, sehingga menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan pada area yang memiliki perubahan geometri dan kekakuan struktur.

Peningkatan tingkat korosi hingga 5,5% menyebabkan berkurangnya ketebalan efektif elemen struktur sehingga kapasitas penampang dalam menahan beban menjadi semakin rendah. Penurunan luas penampang efektif akibat korosi mengakibatkan kemampuan struktur untuk mendistribusikan tegangan secara merata semakin berkurang, sehingga area tertentu mengalami peningkatan risiko deformasi dan kerusakan lokal. Meskipun nilai tegangan maksimum yang diperoleh lebih rendah dibandingkan beberapa variasi korosi sebelumnya, nilainya masih berada pada kisaran tegangan leleh baja kapal normal, yang mengindikasikan bahwa struktur telah mendekati kondisi batas kekuatan (ultimate condition). Oleh karena itu, hasil simulasi ini menunjukkan bahwa korosi seragam sebesar 5,5% memberikan dampak signifikan terhadap penurunan integritas struktural dan ultimate strength penampang kapal, sehingga keberadaan korosi harus menjadi pertimbangan utama dalam evaluasi kekuatan dan umur layan struktur kapal.

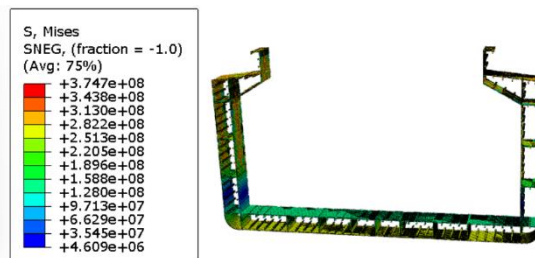


Gambar 4.10 Kontur tegangan pada skenario *double bottom* pada kondisi *hogging* untuk *volume* korosi (ΔV): 5.50%

4.3.9 Kondisi 6%

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA), distribusi tegangan Von Mises pada penampang kapal dengan tingkat uniform corrosion sebesar 6% pada kondisi hogging menunjukkan nilai tegangan maksimum sebesar $3,75 \times 10^8$ Pa (374,7 MPa) dan tegangan minimum sebesar $4,61 \times 10^6$ Pa. Sebaran tegangan terlihat terkonsentrasi pada daerah sambungan antara pelat dasar (bottom plating), pelat sisi (side shell), dan elemen pengaku (stiffener), yang ditunjukkan oleh warna kuning hingga oranye. Selain itu, area sudut bawah (bilge region) juga menunjukkan peningkatan konsentrasi tegangan akibat perubahan geometri struktur yang menyebabkan redistribusi beban tidak berlangsung secara merata. Pola distribusi ini mengindikasikan bahwa bagian-bagian tersebut merupakan lokasi kritis yang mengalami respons tegangan paling tinggi ketika struktur menerima beban lentur memanjang pada kondisi hogging.

Korosi seragam sebesar 6% menyebabkan pengurangan ketebalan elemen struktur yang berdampak pada menurunnya luas penampang efektif dan kekakuan global penampang kapal. Penurunan kapasitas struktur tersebut mengakibatkan tegangan yang bekerja menjadi lebih terkonsentrasi pada area tertentu, sehingga meningkatkan potensi terjadinya deformasi plastis maupun kerusakan lokal. Nilai tegangan maksimum yang diperoleh masih berada pada kisaran tegangan leleh baja kapal konvensional, yang menunjukkan bahwa struktur telah mendekati batas kemampuan layan dan kekuatan ultimitnya. Dengan demikian, hasil simulasi ini menunjukkan bahwa peningkatan tingkat korosi hingga 6% memberikan pengaruh signifikan terhadap perilaku struktur kapal, ditandai dengan meningkatnya konsentrasi tegangan pada daerah kritis serta penurunan kemampuan struktur dalam menahan beban lentur hogging. Kondisi ini mengindikasikan adanya degradasi ultimate strength yang perlu diperhitungkan dalam evaluasi integritas dan keselamatan struktur kapal selama masa operasinya.



Gambar 4.11 Kontur tegangan pada skenario *double bottom* pada kondisi *hogging* untuk *volume* korosi (ΔV): 6%

4.4 Kondisi *Sagging*

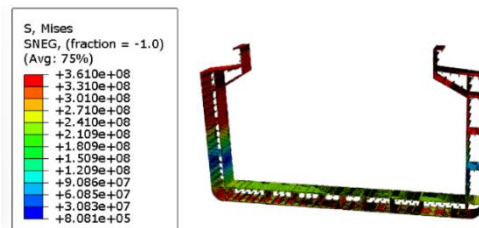
Hasil analisis tegangan Von Mises pada struktur menunjukkan bahwa penyebaran tegangan tidak merata di seluruh komponen. Tegangan maksimum teridentifikasi pada bagian atas rangka, terutama di area sambungan, sudut, dan elemen melintang atas yang ditunjukkan oleh warna merah. Dari area tersebut, tegangan berkurang secara bertahap ke arah bawah sepanjang batang vertikal, yang ditandai dengan perubahan gradasi warna dari merah, kuning, hijau, hingga biru. Pada bagian batang horizontal bawah, tegangan cenderung terdistribusi lebih seragam dengan dominasi warna kuning dan hijau yang merepresentasikan tingkat tegangan sedang. Selain itu, konsentrasi tegangan terlihat pada daerah lengkungan dan titik pertemuan antar elemen struktur akibat adanya perubahan bentuk geometri serta perpindahan beban. Secara umum, distribusi ini mengindikasikan bahwa beban yang bekerja diteruskan dari bagian atas menuju batang vertikal dan selanjutnya disalurkan ke bagian dasar struktur, sehingga area dengan warna merah merupakan zona kritis yang memiliki risiko paling tinggi terhadap terjadinya deformasi maupun kegagalan material apabila tegangan melampaui batas luluhnya.

4.4.1 Kondisi 0%

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA), distribusi tegangan Von Mises pada penampang kapal tanpa korosi (uniform corrosion 0%) pada kondisi *sagging* menunjukkan nilai tegangan maksimum sebesar $3,61 \times 10^8$ Pa (361 MPa) dan tegangan minimum

sebesar $8,08 \times 10^5$ Pa. Sebaran tegangan terlihat cukup merata pada sebagian besar elemen struktur, namun konsentrasi tegangan tertinggi terjadi pada pelat sisi (*side shell*), area sambungan geladak dengan sisi kapal, serta daerah sudut bawah (*bilge region*) yang ditunjukkan oleh warna merah hingga oranye. Konsentrasi tegangan pada lokasi tersebut menunjukkan bahwa area tersebut merupakan bagian struktur yang menerima respons terbesar akibat momen lentur memanjang pada kondisi *sagging*. Pada kondisi ini, bagian dasar kapal cenderung mengalami tegangan tarik, sedangkan bagian geladak mengalami tegangan tekan, sehingga distribusi tegangan terkonsentrasi pada elemen-elemen utama yang berperan dalam menahan beban lentur global.

Model yang dianalisis masih berada pada kondisi tanpa korosi, nilai tegangan maksimum yang diperoleh telah mendekati atau sedikit melampaui tegangan leleh baja kapal konvensional. Hal ini menunjukkan bahwa struktur telah bekerja pada tingkat tegangan yang tinggi ketika menerima pembebanan *sagging*. Namun demikian, karena belum terjadi pengurangan ketebalan akibat korosi, penampang masih memiliki kekakuan dan kapasitas kekuatan yang relatif optimal dalam mendistribusikan beban ke seluruh elemen struktur. Hasil ini dapat dijadikan sebagai kondisi acuan (*baseline condition*) untuk mengevaluasi pengaruh peningkatan tingkat korosi terhadap perubahan distribusi tegangan dan penurunan *ultimate strength* penampang kapal. Dengan demikian, model tanpa korosi menunjukkan performa struktural terbaik dibandingkan variasi korosi lainnya, sehingga setiap peningkatan tingkat korosi selanjutnya dapat dianalisis berdasarkan perubahan respons tegangan terhadap kondisi awal tersebut.

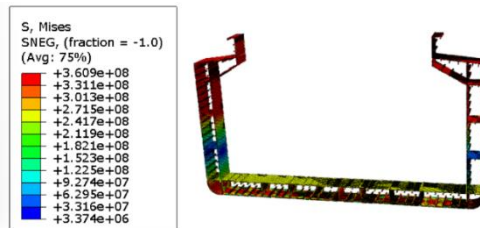


Gambar 4.12 Kontur tegangan pada skenario *double bottom* pada kondisi *sagging* untuk *volume* korosi (ΔV): 0%

4.4.2 Kondisi 2.25%

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA), distribusi tegangan Von Mises pada penampang kapal dengan *uniform corrosion* sebesar 2,25% pada kondisi *sagging* menunjukkan nilai tegangan maksimum sebesar $3,61 \times 10^8$ Pa (360,9 MPa) dan tegangan minimum sebesar $3,37 \times 10^6$ Pa. Distribusi tegangan memperlihatkan konsentrasi yang dominan pada pelat sisi (*side shell*), sambungan antara geladak dan sisi kapal, serta daerah sudut bawah (*bilge region*) yang ditunjukkan oleh warna merah hingga oranye. Selain itu, tegangan relatif tinggi juga teramati pada pelat dasar dan elemen pengaku memanjang yang berfungsi sebagai komponen utama dalam menahan momen lentur global. Pola distribusi ini menunjukkan bahwa beban lentur pada kondisi *sagging* menyebabkan terjadinya akumulasi tegangan pada area-area dengan perubahan geometri dan kekakuan struktur, sehingga berpotensi menjadi lokasi kritis terhadap terjadinya deformasi lokal.

Korosi seragam sebesar 2,25% menyebabkan pengurangan ketebalan elemen struktur yang berdampak pada penurunan luas penampang efektif dan kekakuan struktur. Meskipun tingkat korosi yang terjadi masih relatif kecil, distribusi tegangan menunjukkan kecenderungan meningkatnya konsentrasi tegangan pada beberapa area kritis dibandingkan kondisi tanpa korosi. Nilai tegangan maksimum yang mendekati atau sedikit melampaui tegangan leleh baja kapal mengindikasikan bahwa struktur mulai mengalami penurunan margin keamanan terhadap pembebanan lentur. Dengan demikian, hasil simulasi ini menunjukkan bahwa korosi seragam sebesar 2,25% telah memberikan pengaruh terhadap respons struktural penampang kapal pada kondisi *sagging*, yang ditandai dengan meningkatnya konsentrasi tegangan dan berpotensi menyebabkan penurunan *ultimate strength* apabila tingkat korosi terus bertambah selama masa operasi kapal.



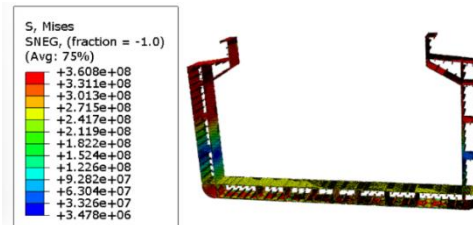
Gambar 4.13 Kontur tegangan pada skenario *double bottom* pada kondisi *sagging* untuk *volume* korosi (ΔV): 2.25%

4.4.3 Kondisi 2.50%

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA), distribusi tegangan Von Mises pada penampang kapal dengan uniform corrosion sebesar 2,50% pada kondisi *sagging* menunjukkan nilai tegangan maksimum sebesar $3,61 \times 10^8$ Pa (360,8 MPa) dan tegangan minimum sebesar $3,48 \times 10^6$ Pa. Kontur tegangan memperlihatkan bahwa konsentrasi tegangan tertinggi terjadi pada daerah pelat sisi (side shell), sambungan antara geladak dan sisi kapal, serta area sudut bawah (bilge region) yang ditunjukkan oleh warna merah hingga oranye. Sementara itu, pelat dasar dan elemen pengaku memanjang menunjukkan distribusi tegangan pada kategori menengah hingga tinggi yang ditandai oleh warna kuning dan hijau. Pola ini mengindikasikan bahwa pada kondisi *sagging*, elemen-elemen utama penampang kapal berperan dominan dalam menahan momen lentur memanjang sehingga terjadi akumulasi tegangan pada daerah yang memiliki perubahan geometri dan kekakuan struktur. Pengurangan ketebalan akibat korosi seragam sebesar 2,50% menyebabkan penurunan luas penampang efektif dan kekakuan struktur, sehingga kemampuan penampang dalam mendistribusikan beban menjadi berkurang. Meskipun nilai tegangan maksimum yang diperoleh relatif tidak jauh berbeda dibandingkan kondisi korosi yang lebih rendah, distribusi tegangan menunjukkan kecenderungan meningkatnya konsentrasi tegangan pada beberapa area kritis. Nilai tegangan maksimum yang berada di sekitar atau sedikit di atas tegangan leleh baja kapal menunjukkan bahwa sebagian elemen struktur telah bekerja pada kondisi mendekati batas elastis material. Oleh karena itu, hasil simulasi ini menunjukkan bahwa korosi seragam sebesar 2,50% mulai memberikan dampak terhadap kinerja struktural penampang kapal, yang ditandai dengan meningkatnya

konsentrasi tegangan dan berpotensi menyebabkan penurunan ultimate strength apabila degradasi akibat korosi terus berlanjut selama umur operasional kapal.

4.4.4 Kondisi 2.75%

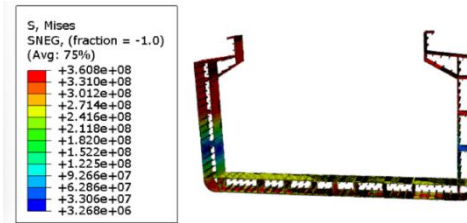


Gambar 4.14 Kontur tegangan pada skenario *double bottom* pada kondisi *sagging* untuk volume korosi (ΔV): 2.50%

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA), distribusi tegangan Von Mises pada penampang kapal dengan uniform corrosion sebesar 2,75% pada kondisi *sagging* menunjukkan nilai tegangan maksimum sebesar $3,61 \times 10^8$ Pa (360,8 MPa) dan tegangan minimum sebesar $3,27 \times 10^6$ Pa. Kontur tegangan memperlihatkan bahwa konsentrasi tegangan tertinggi masih terjadi pada daerah pelat sisi (*side shell*), sambungan antara geladak dan sisi kapal, serta area sudut bawah (*bilge region*) yang ditunjukkan oleh warna merah hingga oranye. Sementara itu, pelat dasar dan elemen pengaku memanjang mengalami distribusi tegangan pada tingkat menengah yang ditandai oleh warna kuning hingga hijau. Pola distribusi tersebut menunjukkan bahwa beban lentur memanjang akibat kondisi *sagging* menghasilkan akumulasi tegangan pada elemen-elemen struktural utama yang berfungsi menahan gaya tarik dan tekan sepanjang penampang kapal.

Korosi seragam sebesar 2,75% menyebabkan terjadinya pengurangan ketebalan elemen struktur yang berdampak pada menurunnya luas penampang efektif dan kekakuan global struktur. Akibatnya, kemampuan struktur dalam mendistribusikan beban menjadi berkurang sehingga konsentrasi tegangan cenderung meningkat pada area-area kritis. Nilai tegangan maksimum yang berada pada kisaran 360 MPa menunjukkan bahwa sebagian elemen struktur telah bekerja mendekati atau melampaui batas leleh baja kapal konvensional. Kondisi ini mengindikasikan adanya potensi terjadinya deformasi plastis lokal apabila pembebanan terus meningkat. Dengan demikian, hasil simulasi menunjukkan bahwa korosi seragam sebesar 2,75% mulai memberikan pengaruh terhadap perilaku kekuatan struktur kapal, yang ditandai dengan meningkatnya konsentrasi tegangan pada daerah kritis dan berpotensi menyebabkan penurunan ultimate

strength serta menurunkan tingkat keandalan struktur selama masa operasional kapal.

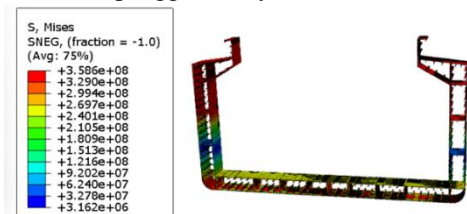


Gambar 4.15 Gambar Kontur tegangan pada skenario *double bottom* pada kondisi *sagging* untuk *volume* korosi (ΔV): 2.75%

4.4.5 Kondisi 3%

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA), distribusi tegangan Von Mises pada penampang kapal dengan uniform corrosion sebesar 3% pada kondisi *sagging* menunjukkan nilai tegangan maksimum sebesar $3,59 \times 10^8$ Pa (358,6 MPa) dan tegangan minimum sebesar $3,16 \times 10^6$ Pa. Sebaran tegangan memperlihatkan konsentrasi tegangan tertinggi pada daerah pelat sisi (*side shell*), sambungan antara geladak dan sisi kapal, serta area sudut bawah (*bilge region*), yang ditunjukkan oleh warna merah hingga oranye. Sementara itu, pelat dasar dan elemen pengaku memanjang menunjukkan distribusi tegangan pada tingkat menengah yang ditandai dengan warna kuning hingga hijau. Pola distribusi ini mengindikasikan bahwa kondisi *sagging* menghasilkan momen lentur memanjang yang menyebabkan elemen-elemen utama penampang kapal mengalami tegangan yang signifikan, terutama pada daerah dengan perubahan geometri dan kekakuan struktur.

Korosi seragam sebesar 3% menyebabkan berkurangnya ketebalan efektif elemen struktur sehingga luas penampang dan kekakuan global penampang kapal mengalami penurunan. Kondisi tersebut mengakibatkan kemampuan struktur dalam mendistribusikan beban menjadi berkurang dan memicu terjadinya konsentrasi tegangan pada area-area kritis. Nilai tegangan maksimum yang mendekati tegangan leleh baja kapal menunjukkan bahwa beberapa bagian struktur telah bekerja pada kondisi mendekati batas elastis material dan memiliki potensi mengalami deformasi plastis apabila pembebanan terus meningkat. Dengan demikian, hasil simulasi ini menunjukkan bahwa korosi seragam sebesar 3% telah memberikan pengaruh terhadap perilaku kekuatan struktur kapal pada kondisi *sagging*, yang ditandai dengan meningkatnya konsentrasi tegangan dan kecenderungan penurunan *ultimate strength*. Oleh karena itu, pengaruh korosi perlu diperhitungkan secara cermat dalam evaluasi integritas struktural dan umur layan kapal untuk menjamin keselamatan operasional selama masa penggunaannya.

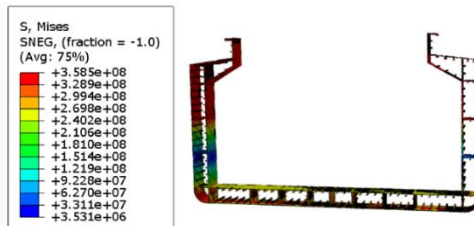


Gambar 4.16 Gambar Kontur tegangan pada skenario *double bottom* pada kondisi *sagging* untuk *volume* korosi (ΔV): 3%

4.4.6 Kondisi 4.50%

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA), distribusi tegangan Von Mises pada penampang kapal dengan uniform corrosion sebesar 4,5% pada kondisi sagging menunjukkan nilai tegangan maksimum sebesar $3,59 \times 10^8$ Pa (358,5 MPa) dan tegangan minimum sebesar $3,53 \times 10^6$ Pa. Distribusi tegangan memperlihatkan konsentrasi tegangan yang dominan pada daerah pelat sisi (side shell), sambungan antara geladak dan sisi kapal, serta area sudut bawah (bilge region) yang ditunjukkan oleh warna merah hingga oranye. Selain itu, pelat dasar dan elemen pengaku memanjang juga mengalami tegangan yang relatif tinggi, ditunjukkan oleh dominasi warna kuning hingga hijau. Pola distribusi ini menunjukkan bahwa kondisi sagging menghasilkan momen lentur memanjang yang menyebabkan tegangan terkonsentrasi pada elemen-elemen utama penampang kapal, terutama pada daerah yang mengalami perubahan geometri dan kekakuan struktur.

Peningkatan tingkat korosi menjadi 4,5% menyebabkan berkurangnya ketebalan efektif elemen struktur sehingga luas penampang dan kekakuan global struktur mengalami penurunan. Kondisi ini mengurangi kemampuan struktur dalam mendistribusikan beban secara merata dan meningkatkan konsentrasi tegangan pada area-area kritis. Nilai tegangan maksimum yang berada pada kisaran 358 MPa menunjukkan bahwa sebagian elemen struktur telah bekerja mendekati batas leleh material baja kapal, sehingga berpotensi mengalami deformasi plastis apabila terjadi peningkatan pembebanan. Hasil simulasi ini mengindikasikan bahwa korosi seragam sebesar 4,5% memberikan dampak yang signifikan terhadap perilaku kekuatan struktur kapal, yang ditandai dengan meningkatnya kerentanan terhadap konsentrasi tegangan dan penurunan kapasitas ultimate strength. Oleh karena itu, degradasi ketebalan akibat korosi perlu diperhitungkan dalam evaluasi integritas struktural untuk memastikan tingkat keselamatan dan keandalan kapal selama masa operasionalnya.



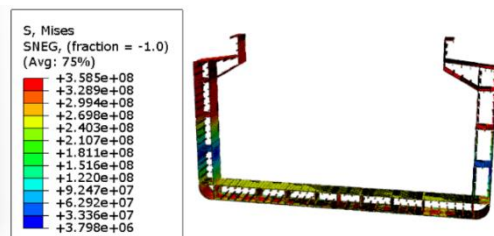
Gambar 4.17 Gambar Kontur tegangan pada skenario *double bottom* pada kondisi *sagging* untuk *volume* korosi (ΔV): 4.50%

4.4.7 Kondisi 5%

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA), distribusi tegangan Von Mises pada penampang kapal dengan uniform corrosion sebesar 5% pada kondisi *sagging* menunjukkan nilai tegangan maksimum sebesar $3,59 \times 10^8$ Pa (358,5 MPa) dan tegangan minimum sebesar $3,80 \times 10^6$ Pa. Kontur tegangan memperlihatkan bahwa konsentrasi tegangan tertinggi terjadi pada daerah pelat sisi (*side shell*), sambungan antara geladak dan sisi kapal, serta area sudut bawah (*bilge region*) yang ditunjukkan oleh warna merah hingga oranye. Tegangan yang relatif tinggi juga terdistribusi pada pelat dasar dan elemen pengaku memanjang, yang berfungsi sebagai komponen utama dalam menahan momen lentur memanjang akibat kondisi

sagging. Pola distribusi ini menunjukkan bahwa beban lentur menyebabkan terjadinya akumulasi tegangan pada area yang memiliki perubahan geometri dan kekakuan struktur, sehingga berpotensi menjadi lokasi kritis terhadap terjadinya deformasi maupun kegagalan lokal.

Korosi seragam sebesar 5% mengakibatkan berkurangnya ketebalan elemen struktur yang berdampak pada penurunan luas penampang efektif serta kekakuan global penampang kapal. Kondisi tersebut menyebabkan kemampuan struktur dalam mendistribusikan beban menjadi semakin berkurang, sehingga konsentrasi tegangan pada area kritis menjadi lebih dominan. Nilai tegangan maksimum yang berada pada kisaran 358 MPa menunjukkan bahwa sebagian elemen struktur telah bekerja mendekati batas leleh material baja kapal, sehingga risiko terjadinya deformasi plastis dan penurunan kapasitas kekuatan struktur menjadi lebih besar. Dengan demikian, hasil simulasi ini menunjukkan bahwa peningkatan tingkat korosi hingga 5% memberikan pengaruh yang signifikan terhadap respons struktur kapal pada kondisi *sagging*, yang ditandai dengan meningkatnya konsentrasi tegangan dan berkurangnya kemampuan struktur dalam menahan beban lentur. Kondisi ini mengindikasikan adanya penurunan *ultimate strength* yang perlu diperhitungkan dalam evaluasi integritas struktural dan keselamatan operasional kapal.



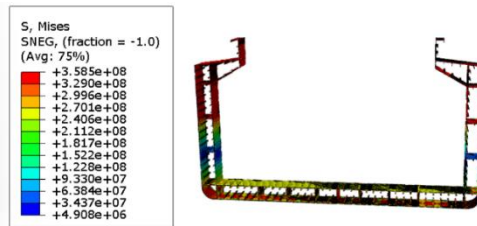
Gambar 4.18 Kontur tegangan pada skenario *double bottom* pada kondisi *sagging* untuk volume korosi (ΔV): 5%

4.4.8 Kondisi 5.50%

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA), distribusi tegangan Von Mises pada penampang kapal dengan *uniform corrosion* sebesar 5,5% pada kondisi *sagging* menunjukkan nilai tegangan maksimum sebesar $3,59 \times 10^8$ Pa (358,5 MPa) dan tegangan minimum sebesar $4,91 \times 10^6$ Pa. Kontur tegangan memperlihatkan bahwa konsentrasi tegangan tertinggi masih terlokalisasi pada daerah pelat sisi (*side shell*), sambungan antara geladak dan sisi kapal, serta area sudut bawah (*bilge region*) yang ditunjukkan oleh warna merah hingga oranye. Sementara itu, pelat dasar dan elemen pengaku memanjang mengalami distribusi tegangan pada tingkat menengah yang ditandai oleh warna kuning hingga hijau. Pola distribusi ini menunjukkan bahwa kondisi *sagging* menghasilkan momen lentur memanjang yang menyebabkan tegangan terkonsentrasi pada elemen-elemen struktural utama yang berperan dalam menahan beban global kapal.

Peningkatan tingkat korosi menjadi 5,5% mengakibatkan berkurangnya ketebalan efektif elemen struktur sehingga luas penampang dan kekakuan global struktur mengalami penurunan. Akibatnya, kemampuan struktur dalam mendistribusikan beban secara merata menjadi semakin berkurang dan konsentrasi tegangan pada area kritis cenderung meningkat. Nilai tegangan maksimum yang berada pada kisaran 358 MPa menunjukkan bahwa beberapa bagian struktur telah bekerja mendekati batas leleh baja kapal, sehingga

meningkatkan potensi terjadinya deformasi plastis, *local buckling*, maupun penurunan kapasitas kekuatan ultimit. Hasil simulasi ini mengindikasikan bahwa korosi seragam sebesar 5,5% memberikan dampak yang signifikan terhadap perilaku struktur kapal pada kondisi *sagging*, ditandai dengan meningkatnya kerentanan terhadap konsentrasi tegangan dan menurunnya kemampuan struktur dalam menahan pembebanan lentur. Oleh karena itu, pengaruh korosi perlu dipertimbangkan secara komprehensif dalam evaluasi integritas struktural guna menjamin keselamatan dan keandalan kapal selama masa operasionalnya.



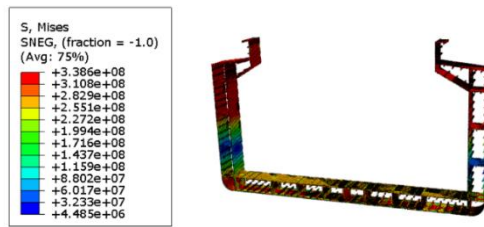
Gambar 4.19 Kontur tegangan pada skenario *double bottom* pada kondisi *sagging* untuk volume korosi (ΔV): 5.50%

4.4.9 Kondisi 6%

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA), distribusi tegangan Von Mises pada penampang kapal dengan uniform corrosion sebesar 6% pada kondisi *sagging* menunjukkan nilai tegangan maksimum sebesar $3,39 \times 10^8$ Pa (338,6 MPa) dan tegangan minimum sebesar $4,49 \times 10^6$ Pa. Sebaran tegangan memperlihatkan bahwa konsentrasi tegangan tertinggi masih terjadi pada daerah pelat sisi (*side shell*), sambungan antara geladak dan sisi kapal, serta area sudut bawah (*bilge region*), yang ditunjukkan oleh warna merah hingga oranye. Sementara itu, pelat dasar dan elemen pengaku memanjang menunjukkan distribusi tegangan pada tingkat menengah yang ditandai dengan warna kuning hingga hijau. Pola distribusi ini mengindikasikan bahwa beban lentur memanjang akibat kondisi *sagging* masih didominasi oleh elemen-elemen utama penampang kapal, sehingga daerah dengan perubahan geometri dan diskontinuitas kekakuan menjadi lokasi terjadinya konsentrasi tegangan.

Korosi seragam sebesar 6% menyebabkan penurunan ketebalan elemen struktur yang berdampak langsung pada berkurangnya luas penampang efektif dan kekakuan global struktur. Meskipun nilai tegangan maksimum pada model ini mengalami penurunan menjadi sekitar 338,6 MPa dibandingkan beberapa variasi korosi sebelumnya, distribusi tegangan menunjukkan bahwa struktur telah mengalami redistribusi beban akibat degradasi material yang semakin besar. Nilai tegangan maksimum tersebut masih berada pada kisaran tegangan leleh baja kapal normal, sehingga menunjukkan bahwa struktur bekerja pada kondisi yang mendekati batas kapasitasnya. Hasil simulasi ini mengindikasikan bahwa korosi seragam sebesar 6% telah menyebabkan penurunan kemampuan struktur dalam menahan beban lentur *sagging*, yang tercermin dari perubahan pola distribusi tegangan dan berkurangnya kapasitas kekuatan ultimit (*ultimate strength*). Oleh karena itu, peningkatan tingkat korosi harus menjadi pertimbangan penting dalam evaluasi integritas struktural kapal

karena dapat mengurangi tingkat keselamatan dan keandalan struktur selama masa operasionalnya.

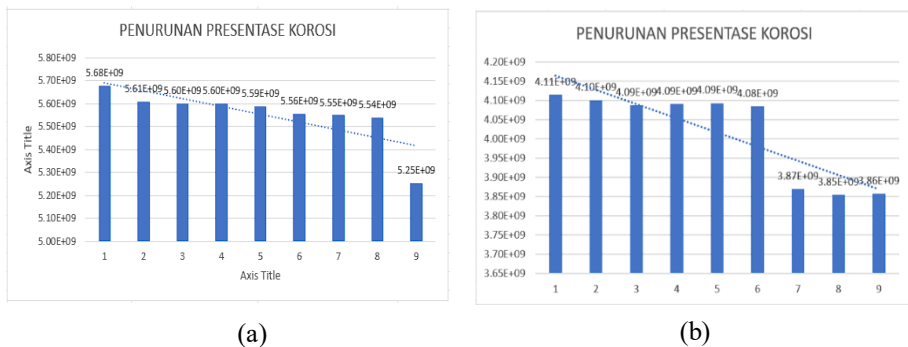


Gambar 4.20 Kontur tegangan pada skenario *double bottom* pada kondisi *sagging* untuk volume korosi (ΔV): 6%

4.5 Reduction Moment

Berdasarkan grafik pertama, terlihat bahwa nilai *ultimate bending* moment cenderung menurun seiring bertambahnya persentase korosi. Pada kondisi awal, nilai momen lentur maksimum berada pada kisaran $4,11 \times 10^9$ N·mm, kemudian mengalami penurunan bertahap hingga mencapai sekitar $3,85\text{--}3,86 \times 10^9$ N·mm pada tingkat korosi tertinggi. Meskipun terdapat fluktuasi pada beberapa kondisi, seperti kenaikan nilai pada titik ke-6 sebesar $4,08 \times 10^9$ N·mm, tren garis menunjukkan kecenderungan menurun secara keseluruhan. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan korosi menyebabkan berkurangnya kapasitas penampang struktur dalam menahan beban lentur akibat berkurangnya ketebalan dan luas efektif material.

Berdasarkan grafik kedua, nilai *ultimate bending* moment juga menunjukkan kecenderungan menurun dengan bertambahnya persentase korosi. Nilai awal sebesar $5,68 \times 10^9$ N·mm berangsur-angsur menurun menjadi $5,25 \times 10^9$ N·mm pada kondisi korosi terbesar. Penurunan tersebut berlangsung relatif bertahap dan konsisten, meskipun terdapat sedikit perbedaan nilai antar beberapa kondisi korosi. Garis tren yang menurun menunjukkan bahwa degradasi material akibat korosi mengurangi kekakuan dan kekuatan struktur, sehingga kemampuan struktur untuk menahan momen lentur maksimum menjadi lebih rendah. Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa semakin besar tingkat korosi yang terjadi, semakin besar pula penurunan kapasitas *ultimate bending* moment struktur.



Gambar 4.21 Persentase penurunan nilai *ultimate strength* pada skenario *double bottom*: (a) kondisi *sagging*, (b) kondisi *hogging* (Sumber; penulis 2026)

4.6 Validasi Data Hogging

Sebelum melakukan analisis pengaruh korosi terhadap kekuatan struktur, diperlukan proses validasi untuk memastikan bahwa model numerik yang digunakan mampu merepresentasikan perilaku struktur secara akurat. Pada penelitian ini, validasi dilakukan dengan membandingkan nilai *ultimate bending moment* yang diperoleh dari perhitungan analitik menggunakan pendekatan *yield moment* dengan nilai *ultimate bending moment* hasil simulasi numerik menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) pada Abaqus. Perhitungan analitik dilakukan berdasarkan hubungan antara tegangan luluh material dan *section* modulus penampang, sedangkan hasil numerik diperoleh dari puncak kurva *moment curvature* pada kondisi struktur utuh (*intact*). Tingkat kesesuaian kedua metode dievaluasi melalui perhitungan persentase error, sehingga dapat diketahui tingkat keandalan model numerik yang digunakan dalam penelitian ini.

4.6.1 Validasi 0% Hogging

Validasi model numerik dilakukan dengan membandingkan nilai *ultimate bending moment* hasil perhitungan analitik dengan hasil simulasi *Finite Element Analysis* (FEA) menggunakan Abaqus. Nilai *ultimate bending moment* analitik dihitung berdasarkan tegangan luluh material dan *section* modulus penampang, sedangkan nilai numerik diperoleh dari puncak kurva *moment-curvature*. Persentase error digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian kedua metode tersebut.

Hasil Teoritis

Rumus:

$$\begin{aligned}M_{teori} &= \sigma_y \times Z \\M_{teori} &= (235 \times 10^6)(17,49) \\M_{teori} &= 4,11015 \times 10^9 \text{ N.m}\end{aligned}$$

atau dibulatkan:

$$M_{teori} = 4,11 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Hasil FEA (Abaqus)

Dari tabel *Moment-Curvature*, momen maksimum adalah:

$$M_{FEA} = 4,11385 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Persentase Error (Validasi)

$$\begin{aligned}\%Error &= \frac{|M_{FEA} - M_{teori}|}{M_{teori}} \times 100\% \\&= \frac{|4,11385 \times 10^9 - 4,11015 \times 10^9|}{4,11015 \times 10^9} \times 100\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{3,70 \times 10^6}{4,11015 \times 10^9} \times 100\% \\
 &= 0,0899\%
 \end{aligned}$$

$$\boxed{\%Error = 0,09\%}$$

4.6.2 Validasi 2.25% Hogging

Validasi model numerik dilakukan dengan membandingkan nilai ultimate bending moment hasil perhitungan analitik dengan hasil simulasi Finite Element Analysis (FEA) menggunakan Abaqus. Nilai ultimate bending moment analitik dihitung berdasarkan tegangan luluh material dan section modulus penampang, sedangkan nilai numerik diperoleh dari puncak kurva *moment-curvature*. Persentase error digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian kedua metode tersebut.

Rumus:

$$\begin{aligned}
 M_{teori} &= \sigma_y \times Z \\
 M_{teori} &= (235 \times 10^6)(17,49) \\
 M_{teori} &= 4,11015 \times 10^9 \text{ N.m}
 \end{aligned}$$

atau dibulatkan menjadi:

$$\boxed{M_U = 4,11 \times 10^9 \text{ N.m}}$$

Hasil FEA (Abaqus)

Dari tabel Moment-Curvature, momen maksimum adalah:

$$\boxed{M_{FEA} = 4,101 \times 10^9 \text{ N.m}}$$

Persentase Error (Validasi)

$$\begin{aligned}
 \%Error &= \frac{|M_{FEA} - M_U|}{M_U} \times 100\% \\
 &= \frac{|4,101 \times 10^9 - 4,11015 \times 10^9|}{4,11015 \times 10^9} \times 100\% \\
 &= \frac{9,15 \times 10^6}{4,11015 \times 10^9} \times 100\% \\
 &\boxed{\%Error = 0,22\%}
 \end{aligned}$$

4.6.3 Validasi 2.50% Hogging

Validasi model numerik dilakukan dengan membandingkan nilai ultimate bending moment hasil perhitungan analitik dengan hasil simulasi Finite Element Analysis (FEA) menggunakan Abaqus. Nilai ultimate bending moment analitik dihitung berdasarkan tegangan luluh material dan section modulus penampang, sedangkan nilai numerik diperoleh dari puncak kurva *moment-*

curvature. Persentase error digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian kedua metode tersebut.

Rumus:

$$\begin{aligned} M_{teori} &= \sigma_y \times Z \\ M_{teori} &= (235 \times 10^6)(17,49) \\ M_{teori} &= 4,11015 \times 10^9 \text{ N.m} \end{aligned}$$

atau dibulatkan menjadi:

$$M_U = 4,11 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Hasil FEA (Abaqus)

Dari tabel Moment-Curvature, momen maksimum adalah:

$$M_{FEA} = 4,08673 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Persentase Error (Validasi)

$$\begin{aligned} \%Error &= \frac{|M_{FEA} - M_U|}{M_U} \times 100\% \\ &= \frac{|4,08673 \times 10^9 - 4,11015 \times 10^9|}{4,11015 \times 10^9} \times 100\% \\ &= \frac{23,42 \times 10^6}{4,11015 \times 10^9} \times 100\% \\ \%Error &= 0,57\% \end{aligned}$$

4.6.4 Validasi 2.75% Hogging

Validasi model numerik dilakukan dengan membandingkan nilai ultimate bending moment hasil perhitungan analitik dengan hasil simulasi Finite Element Analysis (FEA) menggunakan Abaqus. Nilai ultimate bending moment analitik dihitung berdasarkan tegangan luluh material dan section modulus penampang, sedangkan nilai numerik diperoleh dari puncak kurva *moment-curvature*. Persentase error digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian kedua metode tersebut.

Rumus:

$$\begin{aligned} M_{teori} &= \sigma_y \times Z \\ M_{teori} &= (235 \times 10^6)(17,49) \\ M_{teori} &= 4,11015 \times 10^9 \text{ N.m} \end{aligned}$$

atau dibulatkan menjadi:

$$M_U = 4,11 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Hasil FEA (Abaqus)

Dari tabel Moment-Curvature, momen maksimum adalah:

$$M_{FEA} = 4,08987 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Persentase Error (Validasi)

$$\begin{aligned}\%Error &= \frac{|M_{FEA} - M_U|}{M_U} \times 100\% \\ &= \frac{|4,08987 \times 10^9 - 4,11015 \times 10^9|}{4,11015 \times 10^9} \times 100\% \\ &= \frac{20,28 \times 10^6}{4,11015 \times 10^9} \times 100\% \\ \boxed{\%Error = 0,49\%}\end{aligned}$$

4.6.5 Validasi 3% Hogging

Validasi model numerik dilakukan dengan membandingkan nilai ultimate bending moment hasil perhitungan analitik dengan hasil simulasi Finite Element Analysis (FEA) menggunakan Abaqus. Nilai ultimate bending moment analitik dihitung berdasarkan tegangan luluh material dan section modulus penampang, sedangkan nilai numerik diperoleh dari puncak kurva *moment-curvature*. Persentase error digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian kedua metode tersebut.

Rumus:

$$\begin{aligned}M_{teori} &= \sigma_y \times Z \\ M_{teori} &= (235 \times 10^6)(17,49) \\ M_{teori} &= 4,11015 \times 10^9 \text{ N.m}\end{aligned}$$

atau dibulatkan menjadi:

$$\boxed{M_U = 4,11 \times 10^9 \text{ N.m}}$$

Hasil FEA (Abaqus)

Dari tabel Moment-Curvature, momen maksimum adalah:

$$\boxed{M_{FEA} = 3,87382 \times 10^9 \text{ N.m}}$$

Persentase Error (Validasi)

$$\begin{aligned}\%Error &= \frac{|M_{FEA} - M_U|}{M_U} \times 100\% \\ &= \frac{|3,87382 \times 10^9 - 4,11015 \times 10^9|}{4,11015 \times 10^9} \times 100\% \\ &= \frac{236,33 \times 10^6}{4,11015 \times 10^9} \times 100\% \\ \boxed{\%Error = 5,75\%}\end{aligned}$$

4.6.6 Validasi 4.50% Hogging

Validasi model numerik dilakukan dengan membandingkan nilai ultimate bending moment hasil perhitungan analitik dengan hasil simulasi Finite Element Analysis (FEA) menggunakan Abaqus. Nilai ultimate bending moment analitik dihitung berdasarkan tegangan luluh material dan section modulus penampang, sedangkan nilai numerik diperoleh dari puncak kurva *moment-*

curvature. Persentase error digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian kedua metode tersebut.

Rumus:

$$\begin{aligned}M_{teori} &= \sigma_y \times Z \\M_{teori} &= (235 \times 10^6)(17,49) \\M_{teori} &= 4,11015 \times 10^9 \text{ N.m}\end{aligned}$$

atau dibulatkan menjadi:

$$M_U = 4,11 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Hasil FEA (Abaqus)

Dari tabel Moment-Curvature, momen maksimum adalah:

$$M_{FEA} = 4,08419 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Persentase Error (Validasi)

$$\begin{aligned}\%Error &= \frac{|M_{FEA} - M_U|}{M_U} \times 100\% \\&= \frac{|4,08419 \times 10^9 - 4,11015 \times 10^9|}{4,11015 \times 10^9} \times 100\% \\&= \frac{25,96 \times 10^6}{4,11015 \times 10^9} \times 100\% \\&= 0,63\%\end{aligned}$$

4.6.7 Validasi 5% Hogging

Validasi model numerik dilakukan dengan membandingkan nilai ultimate bending moment hasil perhitungan analitik dengan hasil simulasi Finite Element Analysis (FEA) menggunakan Abaqus. Nilai ultimate bending moment analitik dihitung berdasarkan tegangan luluh material dan section modulus penampang, sedangkan nilai numerik diperoleh dari puncak kurva *moment-curvature*. Persentase error digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian kedua metode tersebut.

Rumus:

$$\begin{aligned}M_{teori} &= \sigma_y \times Z \\M_{teori} &= (235 \times 10^6)(17,49) \\M_{teori} &= 4,11015 \times 10^9 \text{ N.m}\end{aligned}$$

atau dibulatkan menjadi:

$$M_U = 4,11 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Hasil FEA (Abaqus)

Dari tabel Moment-Curvature, momen maksimum adalah:

$$M_{FEA} = 3,86895 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Persentase Error (Validasi)

$$\begin{aligned} \%Error &= \frac{|3,86895 \times 10^9 - 4,11015 \times 10^9|}{4,11015 \times 10^9} \times 100\% \\ &= \frac{241,20 \times 10^6}{4,11015 \times 10^9} \times 100\% \\ \%Error &= 5,87\% \end{aligned}$$

4.6.8 Validasi 5.50% Hogging

Validasi model numerik dilakukan dengan membandingkan nilai ultimate bending moment hasil perhitungan analitik dengan hasil simulasi Finite Element Analysis (FEA) menggunakan Abaqus. Nilai ultimate bending moment analitik dihitung berdasarkan tegangan luluh material dan section modulus penampang, sedangkan nilai numerik diperoleh dari puncak kurva *moment-curvature*. Persentase error digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian kedua metode tersebut.

Rumus:

$$\begin{aligned} M_{teori} &= \sigma_y \times Z \\ M_{teori} &= (235 \times 10^6)(17,49) \\ M_{teori} &= 4,11015 \times 10^9 \text{ N.m} \end{aligned}$$

atau dibulatkan menjadi:

$$M_U = 4,11 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Hasil FEA (Abaqus)

Dari tabel Moment-Curvature, momen maksimum adalah:

$$M_{FEA} = 3,85400 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Persentase Error (Validasi)

$$\begin{aligned} \%Error &= \frac{|3,85400 \times 10^9 - 4,11015 \times 10^9|}{4,11015 \times 10^9} \times 100\% \\ &= \frac{256,15 \times 10^6}{4,11015 \times 10^9} \times 100\% \\ \%Error &= 6,23\% \end{aligned}$$

4.6.9 Validasi 6% Hogging

Validasi model numerik dilakukan dengan membandingkan nilai ultimate bending moment hasil perhitungan analitik dengan hasil simulasi Finite Element Analysis (FEA) menggunakan Abaqus. Nilai ultimate bending moment analitik dihitung berdasarkan tegangan luluh material dan section modulus penampang, sedangkan nilai numerik diperoleh dari puncak kurva *moment-curvature*. Persentase error digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian kedua metode tersebut.

Rumus:

$$\begin{aligned} M_{teori} &= \sigma_y \times Z \\ M_{teori} &= (235 \times 10^6)(17,49) \\ M_{teori} &= 4,11015 \times 10^9 \text{ N.m} \end{aligned}$$

atau dibulatkan menjadi:

$$M_U = 4,11 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Hasil FEA (Abaqus)

Dari tabel Moment-Curvature, momen maksimum adalah:

$$M_{FEA} = 3,85717 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Persentase Error (Validasi)

$$\%Error = \frac{|3,85717 \times 10^9 - 4,11015 \times 10^9|}{4,11015 \times 10^9} \times 100\%$$

$$= \frac{252,98 \times 10^6}{4,11015 \times 10^9} \times 100\%$$

$$\%Error = 6,15\%$$

4.7 Validasi Data *Sagging*

Sebelum melakukan analisis pengaruh korosi terhadap kekuatan struktur, diperlukan proses validasi untuk memastikan bahwa model numerik yang digunakan mampu merepresentasikan perilaku struktur secara akurat. Pada penelitian ini, validasi dilakukan dengan membandingkan nilai *ultimate bending moment* yang diperoleh dari perhitungan analitik menggunakan pendekatan *yield moment* dengan nilai *ultimate bending moment* hasil simulasi numerik menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) pada Abaqus. Perhitungan analitik dilakukan berdasarkan hubungan antara tegangan luluh material dan *section* modulus penampang, sedangkan hasil numerik diperoleh dari puncak kurva *moment curvature* pada kondisi struktur utuh (*intact*). Tingkat kesesuaian kedua metode dievaluasi melalui perhitungan persentase error, sehingga dapat diketahui tingkat keandalan model numerik yang digunakan dalam penelitian ini.

4.7.1 Validasi 0% *Sagging*

Validasi model numerik dilakukan dengan membandingkan nilai *ultimate bending moment* hasil perhitungan analitik dengan hasil simulasi *Finite Element Analysis* (FEA) menggunakan Abaqus. Nilai *ultimate bending moment* analitik dihitung berdasarkan tegangan luluh material dan *section* modulus penampang, sedangkan nilai numerik diperoleh dari puncak kurva *moment-curvature*. Persentase error digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian kedua metode tersebut.

Rumus:

$$M_{teori} = \sigma_y \times Z$$

$$M_{teori} = (235 \times 10^6)(17,49)$$

$$M_{teori} = 4,11015 \times 10^9 \text{ N.m}$$

atau dibulatkan menjadi:

$$M_U = 4,11 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Hasil FEA (Abaqus)

Dari tabel Moment-Curvature, momen maksimum adalah:

$$M_{FEA} = 5,67727 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Persentase Error (Validasi)

$$\%Error = \frac{|5,67727 - 5,67760|}{5,67760} \times 100\%$$

$$\boxed{\%Error = 0,006\%}$$

4.7.2 Validasi 2.25% *Sagging*

Validasi model numerik dilakukan dengan membandingkan nilai ultimate bending moment hasil perhitungan analitik dengan hasil simulasi Finite Element Analysis (FEA) menggunakan Abaqus. Nilai ultimate bending moment analitik dihitung berdasarkan tegangan luluh material dan section modulus penampang, sedangkan nilai numerik diperoleh dari puncak kurva *moment-curvature*. Persentase error digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian kedua metode tersebut.

Rumus:

$$\begin{aligned} M_{teori} &= \sigma_y \times Z \\ M_{teori} &= (235 \times 10^6)(17,49) \\ M_{teori} &= 4,11015 \times 10^9 \text{ N.m} \end{aligned}$$

atau dibulatkan menjadi:

$$\boxed{M_U = 4,11 \times 10^9 \text{ N.m}}$$

Hasil FEA (Abaqus)

Dari tabel Moment-Curvature, momen maksimum adalah:

$$\boxed{M_{FEA} = 5,60845 \times 10^9 \text{ N.m}}$$

Persentase Error (Validasi)

$$\%Error = \frac{|5,60845 - 5,67760|}{5,67760} \times 100\%$$

$$\boxed{\%Error = 1,22\%}$$

4.7.3 Validasi 2.50% *Sagging*

Validasi model numerik dilakukan dengan membandingkan nilai ultimate bending moment hasil perhitungan analitik dengan hasil simulasi Finite Element Analysis (FEA) menggunakan Abaqus. Nilai ultimate bending moment analitik dihitung berdasarkan tegangan luluh material dan section modulus penampang, sedangkan nilai numerik diperoleh dari puncak kurva *moment-curvature*. Persentase error digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian kedua metode tersebut.

Rumus:

$$\begin{aligned} M_{teori} &= \sigma_y \times Z \\ M_{teori} &= (235 \times 10^6)(17,49) \\ M_{teori} &= 4,11015 \times 10^9 \text{ N.m} \end{aligned}$$

atau dibulatkan menjadi:

$$\boxed{M_U = 4,11 \times 10^9 \text{ N.m}}$$

Hasil FEA (Abaqus)

Dari tabel Moment-Curvature, momen maksimum adalah:

$$M_{FEA} = 5,60111 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Persentase Error (Validasi)

$$\begin{aligned} \%Error &= \frac{|5,60111 \times 10^9 - 5,67760 \times 10^9|}{5,67760 \times 10^9} \times 100\% \\ &= \frac{76,49 \times 10^6}{5,67760 \times 10^9} \times 100\% \\ \%Error &= 1,35\% \end{aligned}$$

4.7.4 Validasi 2.75% Sagging

Validasi model numerik dilakukan dengan membandingkan nilai ultimate bending moment hasil perhitungan analitik dengan hasil simulasi Finite Element Analysis (FEA) menggunakan Abaqus. Nilai ultimate bending moment analitik dihitung berdasarkan tegangan luluh material dan section modulus penampang, sedangkan nilai numerik diperoleh dari puncak kurva *moment-curvature*. Persentase error digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian kedua metode tersebut.

Rumus:

$$\begin{aligned} M_{teori} &= \sigma_y \times Z \\ M_{teori} &= (235 \times 10^6)(17,49) \\ M_{teori} &= 4,11015 \times 10^9 \text{ N.m} \end{aligned}$$

atau dibulatkan menjadi:

$$M_U = 4,11 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Hasil FEA (Abaqus)

Dari tabel Moment-Curvature, momen maksimum adalah:

$$M_{FEA} = 5,59907 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Persentase Error (Validasi)

$$\begin{aligned} \%Error &= \frac{|5,59907 \times 10^9 - 5,67760 \times 10^9|}{5,67760 \times 10^9} \times 100\% \\ &= \frac{78,53 \times 10^6}{5,67760 \times 10^9} \times 100\% \\ \%Error &= 1,38\% \end{aligned}$$

4.7.5 Validasi 3% Sagging

Validasi model numerik dilakukan dengan membandingkan nilai ultimate bending moment hasil perhitungan analitik dengan hasil simulasi Finite Element Analysis (FEA) menggunakan Abaqus. Nilai ultimate bending moment analitik dihitung berdasarkan tegangan luluh material dan section modulus penampang, sedangkan nilai numerik diperoleh dari puncak kurva *moment-curvature*. Persentase error digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian kedua metode tersebut.

Rumus:

$$M_{teori} = \sigma_y \times Z$$

$$M_{teori} = (235 \times 10^6)(17,49)$$

$$M_{teori} = 4,11015 \times 10^9 \text{ N.m}$$

atau dibulatkan menjadi:

$$M_U = 4,11 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Hasil FEA (Abaqus)

Dari tabel Moment-Curvature, momen maksimum adalah:

$$M_{FEA} = 5,58895 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Persentase Error (Validasi)

$$\%Error = \frac{|5,58895 \times 10^9 - 5,67760 \times 10^9|}{5,67760 \times 10^9} \times 100\%$$

$$= \frac{88,65 \times 10^6}{5,67760 \times 10^9} \times 100\%$$

$$\%Error = 1,56\%$$

4.7.6 Validasi 4.50% Sagging

Validasi model numerik dilakukan dengan membandingkan nilai ultimate bending moment hasil perhitungan analitik dengan hasil simulasi Finite Element Analysis (FEA) menggunakan Abaqus. Nilai ultimate bending moment analitik dihitung berdasarkan tegangan luluh material dan section modulus penampang, sedangkan nilai numerik diperoleh dari puncak kurva *moment-curvature*. Persentase error digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian kedua metode tersebut.

Rumus:

$$M_{teori} = \sigma_y \times Z$$

$$M_{teori} = (235 \times 10^6)(17,49)$$

$$M_{teori} = 4,11015 \times 10^9 \text{ N.m}$$

atau dibulatkan menjadi:

$$M_U = 4,11 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Hasil FEA (Abaqus)

Dari tabel Moment-Curvature, momen maksimum adalah:

$$M_{FEA} = 5,55522 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Persentase Error (Validasi)

$$\%Error = \frac{|5,55522 \times 10^9 - 5,67760 \times 10^9|}{5,67760 \times 10^9} \times 100\%$$

$$= \frac{122,38 \times 10^6}{5,67760 \times 10^9} \times 100\%$$

$$\%Error = 2,16\%$$

4.7.7 Validasi 5% *Sagging*

Validasi model numerik dilakukan dengan membandingkan nilai ultimate bending moment hasil perhitungan analitik dengan hasil simulasi Finite Element Analysis (FEA) menggunakan Abaqus. Nilai ultimate bending moment analitik dihitung berdasarkan tegangan luluh material dan section modulus penampang, sedangkan nilai numerik diperoleh dari puncak kurva *moment-curvature*. Persentase error digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian kedua metode tersebut.

Rumus:

$$\begin{aligned}M_{teori} &= \sigma_y \times Z \\M_{teori} &= (235 \times 10^6)(17,49) \\M_{teori} &= 4,11015 \times 10^9 \text{ N.m}\end{aligned}$$

atau dibulatkan menjadi:

$$M_U = 4,11 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Hasil FEA (Abaqus)

Dari tabel Moment-Curvature, momen maksimum adalah:

$$M_{FEA} = 5,54962 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Persentase Error (Validasi)

$$\begin{aligned}\%Error &= \frac{|5,54962 \times 10^9 - 5,67760 \times 10^9|}{5,67760 \times 10^9} \times 100\% \\&= \frac{127,98 \times 10^6}{5,67760 \times 10^9} \times 100\%\end{aligned}$$

$$\%Error = 2,25\%$$

4.7.8 Validasi 5.50% *Sagging*

Validasi model numerik dilakukan dengan membandingkan nilai ultimate bending moment hasil perhitungan analitik dengan hasil simulasi Finite Element Analysis (FEA) menggunakan Abaqus. Nilai ultimate bending moment analitik dihitung berdasarkan tegangan luluh material dan section modulus penampang, sedangkan nilai numerik diperoleh dari puncak kurva *moment-curvature*. Persentase error digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian kedua metode tersebut.

Rumus:

$$\begin{aligned}M_{teori} &= \sigma_y \times Z \\M_{teori} &= (235 \times 10^6)(17,49) \\M_{teori} &= 4,11015 \times 10^9 \text{ N.m}\end{aligned}$$

atau dibulatkan menjadi:

$$M_U = 4,11 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Hasil FEA (Abaqus)

Dari tabel Moment-Curvature, momen maksimum adalah:

$$M_{FEA} = 5,54052 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Persentase Error (Validasi)

$$\begin{aligned} \%Error &= \frac{|5,54052 \times 10^9 - 5,67760 \times 10^9|}{5,67760 \times 10^9} \times 100\% \\ &= \frac{137,08 \times 10^6}{5,67760 \times 10^9} \times 100\% \end{aligned}$$

$$\%Error = 2,41\%$$

4.7.9 Validasi 6% *Sagging*

Validasi model numerik dilakukan dengan membandingkan nilai ultimate bending moment hasil perhitungan analitik dengan hasil simulasi Finite Element Analysis (FEA) menggunakan Abaqus. Nilai ultimate bending moment analitik dihitung berdasarkan tegangan luluh material dan section modulus penampang, sedangkan nilai numerik diperoleh dari puncak kurva *moment-curvature*. Persentase error digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian kedua metode tersebut.

Rumus:

$$\begin{aligned} M_{teori} &= \sigma_y \times Z \\ M_{teori} &= (235 \times 10^6)(17,49) \\ M_{teori} &= 4,11015 \times 10^9 \text{ N.m} \end{aligned}$$

atau dibulatkan menjadi:

$$M_U = 4,11 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Hasil FEA (Abaqus)

Dari tabel Moment-Curvature, momen maksimum adalah:

$$M_{FEA} = 5,25465 \times 10^9 \text{ N.m}$$

Persentase Error (Validasi)

$$\begin{aligned} \%Error &= \frac{|5,25465 \times 10^9 - 5,67760 \times 10^9|}{5,67760 \times 10^9} \times 100\% \\ &= \frac{422,95 \times 10^6}{5,67760 \times 10^9} \times 100\% \end{aligned}$$

$$\%Error = 7,45\%$$

Halaman sengaja dikosongkan