

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis simulasi numerik menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) dengan perangkat lunak Abaqus/Explicit terhadap enam konfigurasi kombinasi material baja struktural S235 (*mild steel*), S350 (*high tensile steel*), dan S460 (*ultra-high tensile steel*) pada komponen *side shell* dan *frame* dalam skenario tumbukan es, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Variasi kombinasi material baja pada *side shell* dan *frame* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap respons struktur kapal akibat tumbukan es. Konfigurasi dengan material berkekuatan tinggi pada *side shell* (S460) terbukti mampu menunda inisiasi robekan pelat dan meningkatkan resistensi lateral awal, sedangkan material yang lebih kuat pada *frame* memberikan kontribusi sebagai penahan beban sekunder pasca kegagalan pelat. Namun, ketidakselarasan kekakuan (*stiffness mismatch*) antara kedua komponen berpengaruh besar terhadap mode kegagalan dan distribusi tegangan yang terjadi.
2. Pengaruh kombinasi material terhadap nilai *contact force*, *failure displacement*, dan deformasi struktur menunjukkan pola yang berbeda pada setiap konfigurasi. Gaya kontak lateral maksimum (F_y) tertinggi dicapai oleh model M4 (S350/S460) sebesar $1.26\text{E}+07$ N pada displacement 317 mm, diikuti model M3 (S350/S235) sebesar $1.23\text{E}+07$ N. Gaya kontak tangensial maksimum (F_x) tertinggi dicapai oleh model M6 (S460/S350) sebesar $1.13\text{E}+07$ N, diikuti M3 (S350/S235) sebesar $1.11\text{E}+07$ N. Tegangan von Mises puncak tertinggi tercatat pada M2 dan M4 yang sama-sama mencapai sekitar 714 MPa, menandakan konsentrasi tegangan ekstrem akibat ketidakselarasan kekakuan yang parah. Sementara itu, model M5 (S460/S235) mencatatkan gaya kontak tangensial maksimum terendah sebesar $8.80\text{E}+06$ N, mengindikasikan keruntuhan struktural global yang prematur akibat kegagalan penegar yang lemah.

3. Berdasarkan evaluasi terhadap respon struktur selama proses tumbukan es, model M4 yang menggunakan kombinasi material *side shell* S350 dan *frame* S460 menunjukkan performa ketahanan yang paling baik dibandingkan variasi lainnya. Konfigurasi ini menghasilkan gaya kontak lateral maksimum (F_y) tertinggi sebesar $1.26E+07$ N pada *displacement* 317 mm, yang menunjukkan kemampuan struktur dalam menahan beban tumbukan sebelum mengalami kegagalan. Selain itu, Model M4 juga menunjukkan distribusi tegangan yang masih dapat ditoleransi oleh sistem struktur meskipun mencapai tegangan von Mises maksimum 714 Mpa pada area konsentrasi tegangan lokal. Penggunaan *frame* S460 memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan kapasitas penyaluran beban dan mempertahankan kekakuan struktur selama proses penetrasi es. Sementara itu, *side shell* S350 masih mampu memberikan kombinasi yang seimbang antara kekuatan dan kemampuan deformasi plastis sehingga kerusakan tidak berkembang secara prematur. Meskipun seluruh model pada penelitian ini pada akhirnya mengalami kegagalan pelat akibat penggunaan *ice rigid body* dengan *displacement* yang dipaksakan hingga tahap penetrasi lanjut, model M4 menunjukkan kemampuan terbaik dalam mempertahankan kapasitas beban selama proses tumbukan. Oleh karena itu, kombinasi material S350 pada *side shell* dan S460 pada *frame* dapat direkomendasikan sebagai konfigurasi yang paling efektif untuk meningkatkan ketahanan struktur stiffened plate terhadap beban tumbukan es pada kondisi pemodelan penelitian ini.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, beberapa saran dirumuskan untuk pengembangan penelitian lebih lanjut maupun penerapan praktis dalam desain struktur kapal tahan es:

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mempertimbangkan pemodelan es yang lebih realistis dengan menggunakan model material *elastoplastis* atau model fragmen (Discrete Element Method/DEM), sehingga disipasi energi pada es itu sendiri dapat diperhitungkan. Pendekatan ini akan memberikan prediksi gaya

kontak dan distribusi tegangan yang lebih mendekati kondisi operasional aktual dibandingkan asumsi *rigid body* yang digunakan pada penelitian ini.

2. Perlu dilakukan studi parametrik yang lebih luas dengan memvariasikan kecepatan tumbukan, massa es, sudut kontak, serta bentuk geometri es yang lebih beragam (misalnya pada *multi-year ice*, *bergy bit*) agar rekomendasi kombinasi material yang dihasilkan bersifat lebih umum dan mencakup berbagai skenario operasional kapal di perairan Arktik dan Baltik.
3. Studi lanjutan yang mempertimbangkan aspek kelelahan material (*fatigue*) dan beban siklis es pada lambung kapal perlu dilakukan, mengingat data statistik kecelakaan menunjukkan bahwa kegagalan struktural akibat kelelahan paling banyak terjadi di area midship. Analisis ini akan melengkapi temuan penelitian saat ini yang berfokus pada skenario iMPak tunggal.
4. Kombinasi material M6 (*side shell* S460 dan *frame* S350) yang diidentifikasi sebagai konfigurasi optimal dalam penelitian ini direkomendasikan untuk dikaji lebih lanjut dalam konteks optimasi bobot struktur dan biaya material, mengingat baja S460 memiliki harga yang lebih tinggi. Analisis *cost benefit* yang menyeluruh diperlukan sebelum penerapan pada desain kapal komersial.
5. Validasi eksperimental menggunakan pengujian fisik skala kecil (*drop weight test* atau *quasi-static indentation test*) terhadap spesimen pelat bertulang dengan kombinasi material serupa sangat disarankan untuk memperkuat validitas model numerik yang telah dikembangkan dalam penelitian ini, sehingga dapat dijadikan acuan teknis yang lebih terpercaya bagi perancang kapal.
6. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi basis data numerik dalam pengembangan standar desain struktural kapal tahan es di Indonesia, khususnya untuk mendukung operasi kapal riset dan kapal niaga yang akan beroperasi di kawasan perairan bersuhu rendah, sejalan dengan rekomendasi IACS Polar Class dan Finnish Swedish Ice Class Rules (FSICR).