

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kapal pengangkut muatan cair, seperti *Crude Palm Oil (CPO)*, dituntut memiliki integritas struktural yang tinggi selama beroperasi di lingkungan laut [1]. Dalam kajian interaksi fluida struktur, kapal dipandang sebagai sistem benda kaku (*rigid body*) bermassa besar yang beroperasi pada media fluida dinamis. Perbedaan karakteristik fisik antara air laut dan struktur kapal, khususnya dari aspek massa dan momen inersia, menyebabkan respons gerak kapal tidak terjadi secara simultan terhadap eksitasi gelombang. Ketika gelombang mengenai lambung, partikel fluida terlebih dahulu mentransfer tekanan hidrodinamik ke permukaan struktur. Di sisi lain, kapal dengan massa dan inersia yang besar cenderung mempertahankan kondisi awalnya, sehingga timbul keterlambatan respons gerak terhadap pembebanan gelombang.

Akibat fenomena tersebut, pelat sisi lambung (*side shell*) menjadi elemen struktur yang secara langsung menerima tekanan hidrodinamik dan transfer energi kinetik dari gelombang sebelum badan kapal bergerak mengikuti arah. Kondisi ini menyebabkan *side shell* mengalami beban dinamis berulang (*cyclic loading*) dalam bentuk tegangan tarik dan tekan yang bekerja secara kontinu selama operasi kapal. Pembebanan siklik yang berlangsung terus-menerus tersebut berpotensi menimbulkan akumulasi kerusakan lelah (*fatigue*), khususnya pada area diskontinuitas geometri dan sambungan las yang memiliki konsentrasi tegangan tinggi.

Fluktuasi tegangan yang terakumulasi secara persisten ini pada akhirnya memicu degradasi kekuatan material yang dikenal sebagai kelelahan (*fatigue*) [2]. Fenomena kelelahan menjadi sangat kritis pada area persimpangan struktur, khususnya pada sambungan las sudut (*fillet weld*) yang mengikat pelat sisi luar dengan penumpu melintang (*transverse web frame*). Perbedaan tingkat kekakuan antara *web frame* yang sangat kaku dan *side shell* yang lebih fleksibel menciptakan konsentrasi tegangan lokal yang ekstrem saat merespons lenturan gelombang. Kondisi ini diperburuk oleh perubahan struktur mikro pada *Heat Affected Zone*

(HAZ) serta distorsi profil geometri pada lekukan ujung las (*weld toe*), menjadikannya titik paling rentan terhadap inisiasi retak lelah [3].

Berbagai studi terdahulu telah berupaya mengevaluasi tingkat kerentanan pada sambungan las struktur baja dan membuktikan bahwa pendekatan tegangan nominal konvensional memiliki keterbatasan yang signifikan karena cenderung mengabaikan efek konsentrasi tegangan lokal yang dipicu oleh diskontinuitas geometri takik las [4]. Untuk mengatasi kelemahan tersebut, beberapa penelitian mengaplikasikan metode *hotspot stress* berbasis *Finite Element Analysis*. Penelitian ini membuktikan bahwa metode tersebut mampu mengekstraksi dan menangkap lonjakan tegangan struktural secara presisi, khususnya pada titik kritis seperti area *weld toe* [6].

Lebih lanjut, evaluasi kelelahan yang komprehensif tidak cukup jika hanya mengandalkan estimasi umur dari Kurva *S-N*, yang merupakan pendekatan empiris berbasis tegangan nominal. Pendekatan *fracture mechanics* diperlukan sebagai tinjauan independen untuk memodelkan laju perambatan retak secara matematis, guna memberikan perspektif tambahan mengenai dinamika pertumbuhan retak yang tidak tertangkap secara eksplisit oleh pendekatan *S-N* [7].

Meskipun metode *hotspot stress* dan *fracture mechanics* telah diakui keandalannya dalam berbagai literatur tersebut, studi yang mengintegrasikan kedua pendekatan ini secara komprehensif, terlebih fokus spesifik pada konstruksi lambung ganda kapal pengangkut *CPO*, masih sangat terbatas. Berdasarkan celah penelitian (*research gap*) dan urgensi keselamatan konstruksi tersebut, maka penelitian ini secara spesifik difokuskan untuk menganalisis sebaran tegangan lokal, estimasi umur lelah, dan laju perambatan retakan pada sambungan las sudut *fillet weld* penumpu melintang *web frame pelat side shell* kapal *CPO* akibat beban berulang dari gelombang.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana sebaran tegangan lokal dan nilai tegangan *hotspot stress* maksimal pada sambungan las sudut *fillet weld* penumpu melintang *web*

frame side shell lambung kapal *CPO* akibat pembebanan siklik gelombang dinamis berdasarkan klasifikasi daerah pelayaran BKI??

2. Bagaimana estimasi *fatigue life* dan laju perambatan retakan pada sambungan las *side shell* pada berbagai skenario daerah pelayaran saat dievaluasi dan dibandingkan menggunakan pendekatan Kurva *S-N* dan *fracture mechanics*?

C. Batasan Penelitian

1. Studi kasus dilakukan pada model struktur lambung kapal *CPO Chemical Oil Barge* berkapasitas 4000 DWT milik PT Wira Bahari Shipyard, Batam. Pemodelan elemen hingga dibatasi pada satu ruang muat (*cargo hold*) di area tengah kapal (*midship section*) dengan konfigurasi *half-breadth* menggunakan pendekatan *sub-modeling* dua tahap, yaitu model global dan model lokal detail sambungan las.
2. Objek analisis tegangan, estimasi umur inisiasi retak, dan laju perambatan retak secara eksklusif difokuskan pada sambungan las sudut *fillet weld* yang menghubungkan penumpu melintang (*transverse web frame*) dengan pelat sisi luar (*side shell*) pada konstruksi lambung ganda (*double hull*), dengan dimensi throat (a) = 5 mm dan kaki las (z) = 7 mm.
3. Pembebanan yang diaplikasikan dibatasi pada tekanan hidrodinamik gelombang laut eksternal berdasarkan formulasi deterministik BKI *Rules for Hull 2026* untuk empat klasifikasi daerah pelayaran (Samudera, P, L, dan T). Beban internal muatan (*sloshing*), tegangan termal, getaran mesin, beban impact, serta efek gerakan kapal enam derajat kebebasan (*six degree of freedom*) tidak diperhitungkan.
4. Ekstraksi nilai tegangan struktural dilakukan menggunakan metode ekstrapolasi linier *hotspot stress* pada dua titik referensi 0,5t dan 1,5t dari *weld toe* (t = 12 mm, tebal pelat *side shell*), sesuai ketentuan BKI *Rules for Hull 2026 Section 20*. Analisis tegangan dibatasi pada komponen tegangan ekuivalen (*von Mises*) tanpa mempertimbangkan efek tegangan multiaksial secara eksplisit.
5. Umur inisiasi retak dievaluasi berdasarkan kurva *S-N* kelas FAT 90 sesuai

katalog detail sambungan BKI. Analisis perambatan retak dibatasi pada kerangka *Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM)* menggunakan Hukum Paris dengan konstanta material $C = 2,6 \times 10^{-11}$, $m = 2,75$, panjang dan retak awal $a_0 = 0,1$ mm.

6. Efek degradasi material akibat korosi air laut, perubahan sifat mekanis pada *Heat Affected Zone (HAZ)*, tegangan sisa pasca-pengelasan, serta cacat geometri pengelasan aktual (*undercut, porositas, incomplete fusion*) tidak diperhitungkan. Struktur diasumsikan dalam kondisi ideal dengan sistem pelapisan (*coating*) yang berfungsi penuh sepanjang masa analisis.

D. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah ditetapkan, maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis sebaran tegangan lokal dan mendeterminasi nilai tegangan *hotspot stress* maksimal pada sambungan las sudut *fillet weld* penumpu melintang *web frame* pelat sisi luar lambung kapal *CPO* akibat pembebanan siklik gelombang dinamis berdasarkan klasifikasi daerah pelayaran BKI.
2. Memprediksi estimasi *fatigue life* dan mengevaluasi laju perambatan retakan pada sambungan las tersebut pada berbagai skenario daerah pelayaran, serta membandingkan hasil estimasi dari pendekatan Kurva *S-N* dan *fracture mechanics* secara independen.

E. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan beberapa manfaat, baik secara akademik maupun praktis dalam bidang desain struktur kapal, yaitu sebagai berikut:

1. Memperkaya literatur dan referensi kajian teknik perkapalan, khususnya terkait pemodelan kegagalan lelah (*fatigue failure*) yang mengintegrasikan metode tegangan *hotspot* dan mekanika retakan pada struktur lambung ganda (*double hull*).
2. Memberikan pemahaman analitis yang lebih komprehensif mengenai perilaku perambatan retak pada daerah *weld toe* akibat interaksi struktur dan beban hidrodinamik gelombang.

3. Memberikan rekomendasi teknis dan parameter desain yang valid bagi pihak galangan kapal (PT Wira Bahari *Shipyards*) dalam mengevaluasi dan meningkatkan keandalan umur struktur lambung kapal *CPO*.
4. Menjadi rujukan tambahan dalam proses verifikasi dan kalibrasi standar keamanan konstruksi kapal berbasis Peraturan BKI, guna memitigasi risiko kegagalan struktur yang dapat menyebabkan pencemaran lingkungan.

