



Investigasi Dampak Insiden Tubrukan Terhadap Respon Struktur Kapal Penumpang Antar Pulau

Aditya Rio Prabowo^{1)*}, Teguh Muttaqie^{2,3)}, Jung Min Sohn^{1,2)}, Dong Myung Bae²⁾

¹⁾Department of Marine Convergence Design, Pukyong National University
Nam-gu, Yongso-ro 45, Busan, Korea Selatan 48513

²⁾Department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National University
Nam-gu, Yongso-ro 45, Busan, Korea Selatan 48513

³⁾Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi
Jalan MH. Thamrin 8, Jakarta, Indonesia 10340

disubmit pada : 20/04/18

direvisi pada : 07/05/18

diterima pada : 13/07/18

Abstrak

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menginvestigasi dampak dari tubrukan pada struktur kapal, dan mengkuantifikasi respon yang dihasilkan oleh struktur lambung ganda. Kasus yang diaplikasikan pada penelitian didesain berdasarkan insiden tubrukan antara Roll on-Roll off (Ro-Ro) Marisa Nusantara dengan Reefer Qihang di Selat Sunda pada # Mei 2014. Analisa dari skenario tubrukan dilaksanakan menggunakan metode elemen hingga (FEM) untuk menghasilkan prediksi dari respon kapal Ro-Ro ketika mengalami tubrukan. Untuk mendapatkan konfigurasi dan setting yang akurat, hasil analisa FEM dibandingkan dengan kalkulasi rumus empiris energi tubrukan. Studi dilanjutkan dengan menganalisa respon struktur dengan memvariasikan internal dan eksternal parameter, yaitu lokasi tubrukan dan material lambung. Berdasarkan karakteristik energi pada lokasi yang telah ditentukan, beberapa target di wilayah after-end dapat disimpulkan sebagai titik kritis jika tubrukan terjadi di pada lokasi ini. Di lain pihak, dengan menentukan target pada struktur dan konstruksi yang sama, penggunaan baja karbon menengah dapat memberikan hambatan struktur yang besar kepada striking ship ketika melakukan penetrasi pada lambung struck ship.

Copyright © 2018, **KAPAL**, pISSN:1829-8370, eISSN : 2301-9069

Kata Kunci : Tubrukan kapal, Ro-Ro penumpang, Lambung ganda, Metode elemen hingga

1. PENDAHULUAN

Sejak dimulainya sejarah industri perkapalan, fenomena tubrukan sudah menarik perhatian yang luas, baik dalam kasus kecelakaan pada moda transportasi darat maupun transportasi laut. Besarnya kemungkinan kejadian tubrukan yang dipengaruhi berbagai faktor, membuat investigasi dan riset di bidang ini terus dilakukan dalam hal aktif (navigasi) maupun pasif (kapabilitas struktur).

Pada moda transportasi laut, sejarah mencatat kecelakaan besar yang melibatkan tubrukan kapal, seperti *Titanic* pada saat pelayaran perdananya di tahun 1912. Karena kuantitas kerugian yang begitu besar dari kecelakaan ini, pihak-pihak terkait mengadakan investigasi dan penelitian yang ditujukan untuk mengevaluasi standar aturan dan keamanan pada saat melakukan operasional di laut.

Meskipun termasuk kejadian yang kompleks, pada dasarnya tubrukan dibagi menjadi bagian, yaitu *external dynamics* dan *internal mechanics* yang keduanya saling berkaitan. Instrumen untuk menganalisa fenomena ini pun turut dikembangkan, sebagai contoh kode numerik –

*) Penulis Korespondensi :
Email : aditya@pukyong.ac.kr

metode elemen hingga (*finite element method - FEM*) guna meningkatkan ketelitian dan kapabilitas dalam memprediksi berbagai kriteria struktur baik saat maupun setelah tubrukan. Dalam riset menggunakan FEM, Kitamura menyatakan bahwa konfigurasi pada analisa tubrukan akan akurat ketika dimodelkan menggunakan asumsi aktual kecelakaan, metode analitik dan elemen hingga [1]. Riset mengenai tubrukan kapal telah dilakukan oleh beberapa peneliti, seperti Haris dan Amdahl [2], Prabowo [3-7] dan Calle et al. [8]. Ketiga contoh sebelumnya menggunakan FEM dalam kalkulasi, dan validasi dengan laboraorium eksperimen. Meskipun akurasi untuk konfigurasi akan semakin baik, tapi proses riset dengan metode ini akan memakan waktu yang tidak sedikit.

Mempertimbangkan metode dalam verifikasi untuk konfigurasi tubrukan dan efektifitas lama waktu riset, penelitian ini ditujukan untuk menginvestigasi perilaku struktur kapal dalam menghadapi beban tubrukan. Skenario utama dimodelkan berdasarkan insiden tubrukan kapal menggunakan FEM. Hasil dari kalkulasi numerik akan dibandingkan lagi dengan hasil kalkulasi menggunakan metode empiris. Analisa lanjutan akan ditujukan untuk mengkuantifikasi efek dari parameter yang termasuk dalam *external dynamics* dan *internal mechanics* pada saat tubrukan.

2. METODE

2.1. Insiden Kecelakaan

Referensi untuk pemodalan kasus kecelakaan diambil berdasarkan kasus kecelakaan yang melibatkan Ro-Ro Marisa Nusantara dan Reefer Qi Hang di Selat Sunda. Pada saat tubrukan, *Ro-Ro* bertindak sebagai *struck ship*, sedangkan *reefer* berperan sebagai *striking ship* [9]. Diprediksi, dalam kecelakaan, *striking ship* melaju dengan kecepatan 12 kts., atau pada kisaran 6.17 m/s. Hasil survey lapangan, kerusakan pada *struck ship* diperoleh dengan panjang 7 meter, lebar 5 meter, dan kedalaman 2 meter. Lebih detail, sobekan pada lambung terdapat pada lambung ampung diantara *main deck* dan *middle deck*.

2.2. Prosedur Investigasi

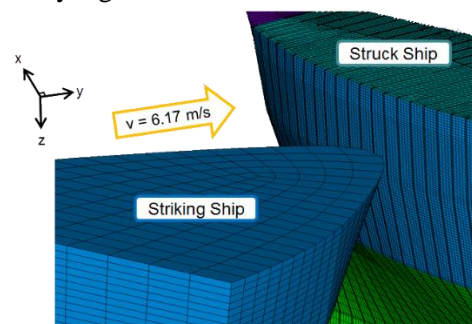
Metode nonlinier FEM akan digunakan untuk melakukan kalkulasi numerik berdasarkan aktual skenario tubrukan, dengan target keluaran tingkat kerusakan dan energi tubrukan. Hasil dari kalkulasi energi akan dibandingkan dengan perhitungan yang menggunakan formula empiris. Pada riset ini, rumus yang dikembangkan oleh Zhang [10] akan digunakan untuk menghitung energi berdasarkan

kerusakan pada lambung samping *struck ship*. Persamaan matematis dari rumus empiris dibagi berdasarkan dua bentuk kerusakan, yaitu lipatan dan robekan, sesuai dengan yang ditulis pada persamaan 1 dan 2.

$$E = 3.50 \left(\frac{t}{d} \right)^{0.67} \sigma_0 R_T \quad (1)$$

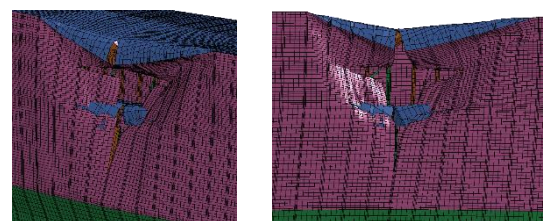
$$E = 3.21 \left(\frac{t}{l} \right)^{0.6} \sigma_0 R_T \quad (2)$$

dimana: E = energi terserap dalam tubrukan, t = tebal plat rata-rata, d = tebal plat rata-rata pada penampang subjek yang rusak, l = panjang kritis kerusakan, σ_0 = *flow stress* dan R_T = volume material yang rusak.



Gambar 1. Illustration of collision process.

Titik target pada *struck ship* ditentukan pada lambung samping diantara *main deck* dan *middle deck*. Kecepatan *striking ship* saat kontak dengan target ditentukan sebesar 6.17 m/s, dimana *struck ship* diberi batasan olah gerak aksial dan rotasional untuk pada semua arah. Kedua kapal didesain secara numerik menggunakan *shell element* dengan tipe formulasi Belytschko-Tsay diimplementasikan pada model [11]. Ilustrasi dari skenario tubrukan diberikan pada Gambar 1.



(a)



(b)

Gambar 2. Kontur kerusakan pada *struck ship*: (a) analisa FEM and (b) aktual insiden.

Hasil kalkulasi mengenai bentuk kerusakan pada *struck ship* menggunakan metode elemen hingga dibandingkan dengan kerusakan dari aktual insiden tubrukan (Gambar 2). Dari segi geometri, kerusakan yang dihasilkan secara numerik mengindikasikan kesamaan yang baik. Kesimpulan ini juga didukung dengan tingkat kerusakan yang serupa dengan insiden tubrukan, yaitu panjang 7 meter, lebar 4.5 m, dan kedalaman 2 meter.

Setelah verifikasi dalam hal kerusakan diselesaikan, perbandingan untuk energi tubrukan (Tabel 1) akan dilakukan pada tahap sebelumnya. Dengan kalkulasi empiris menggunakan formula dari Zhang, didapat bahwa perbedaan dengan FEM sangat kecil, yaitu dibawah 5%.

Tabel 1. Verifikasi Energi Tubrukan.

Kasus	Energi (MJ)		Selisih (%)
	FEM	Empiris	
Tubrukan kapal	6.91344	6.96731	0.7732

2.3. Parameter untuk Analisa Tubrukan

Konfigurasi metode elemen hingga (FEM) di analisa sebelumnya akan digunakan untuk simulasi numerik dengan ANSYS LS-DYNA [12] tubrukan kapal dengan parameter berbeda, yaitu lokasi tubrukan dan material lambung kapal. Variasi dalam hal lokasi akan ditentukan pada arah longitudinal lambung kapal, dan tiga material berbeda seperti yang diberikan pada Tabel 2, akan diaplikasikan pada geometri kapal. Detail *setting* untuk simulasi diberikan sebagai berikut:

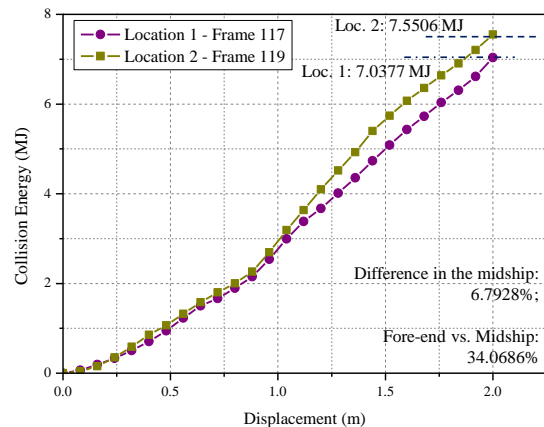
1. Jarak antara dua target ditetapkan pada dua web yang berdekatan dengan $l < 2$ m.
2. Baja pada lambung kapal diasumsikan sebagai *plastic-kinematic material* [13].
3. Waktu simulasi dibatasi sangat pendek, yaitu 0.567 s untuk memenuhi kriteria beban impak.
4. Kecepatan *striking ship* diberikan sebesar 6.17 m/s berdasarkan aktual insiden.
5. Koefisien gesek antara baja diaplikasikan pada konfigurasi kontak.

Tabel 2. Material Kapal pada Simulasi Numerik.

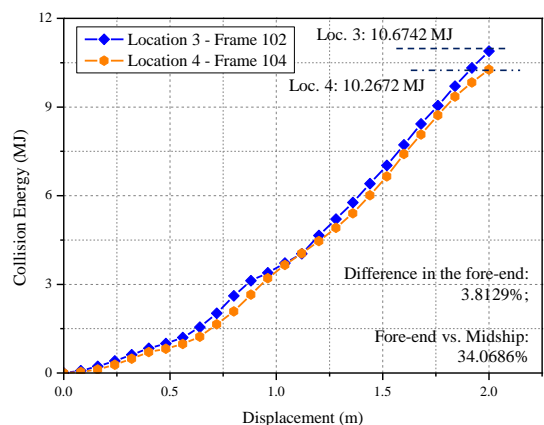
Properties	Low-carbon	Medium-carbon	Alloy Steel
Density (kg/m ³)	7865	7850	7850
Poisson's ratio	0.27	0.3	0.29
Yield strength (MPa)	310	440	315
Young's modulus (MPa)	200000	210000	200000

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

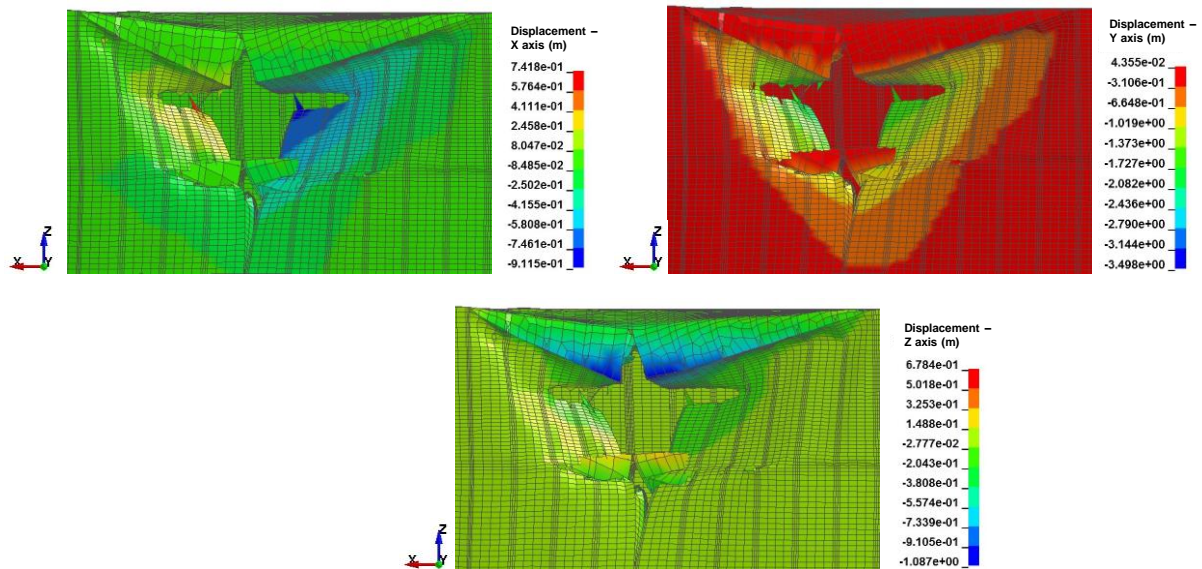
Kalkulasi energi tubrukan menggunakan metode elemen hingga akan dipresentasikan pada bagian ini. Energi diberikan berdasarkan lokasi, yaitu *fore-end* pada Gambar 3, dan *midship* pada Gambar 4. Kedua lokasi mengindikasikan bahwa perubahan lokasi target di arah longitudinal tidak menunjukkan perubahan yang signifikan. Namun, dapat dilihat bahwa perbedaan antara di *fore-end* relative lebih besar dibandingkan dengan di daerah *midship*. Pola energi seperti ini muncul disebabkan perbedaan geometri kedua lokasi. Penampang pada *fore-end* saat tubrukan cenderung berbeda di arah longitudinal dikarenakan membetuk *streamline*. Di lain pihak, *midship* memiliki penampang berbentuk konstan dan lurus, sehingga menghasilkan energi tubrukan yang mirip. Berdasarkan hasil, direkomendasikan pada saat penentuan konfigurasi tubrukan, jarak antara kedua target lebih besar daripada 2 m untuk mendapatkan perbedaan yang signifikan. Dalam hal kekuatan struktur lambung, perbandingan antara kedua lokasi menunjukkan bahwa *midship* lebih kuat daripada *fore-end* dengan estimasi diatas 30% disaat menerima beban tubrukan dari arah samping.



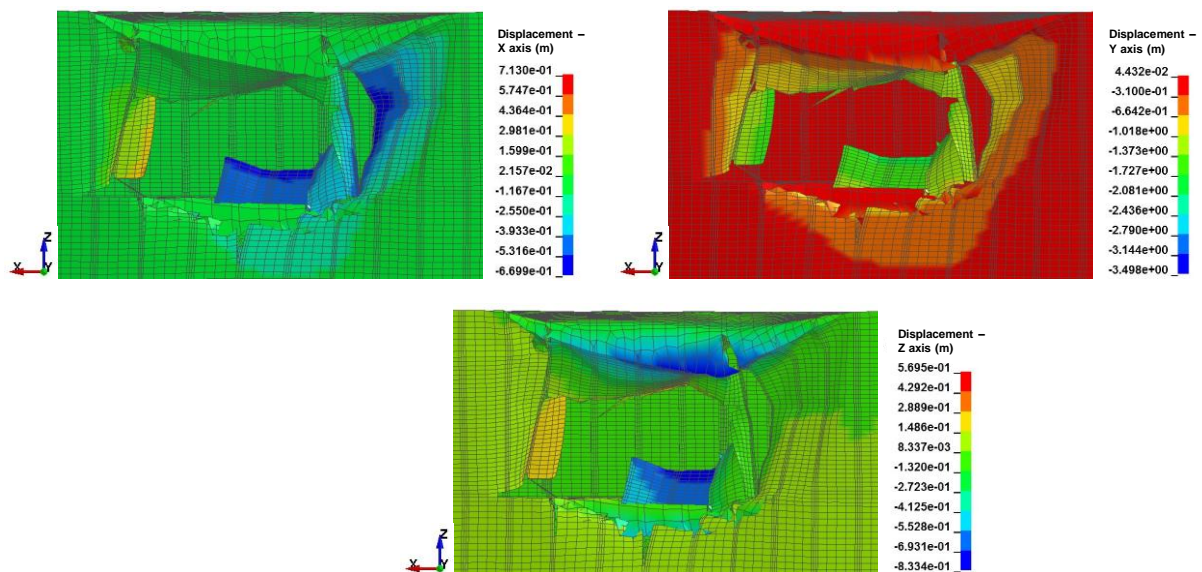
Gambar 3. Karakteristik energi tubrukan untuk lokasi *fore-end*.



Gambar 4. Energi tubrukan untuk target lokasi *midship*.



Gambar 5. Kerusakan pada lokasi no.1 di bagian struktur *fore-end*.

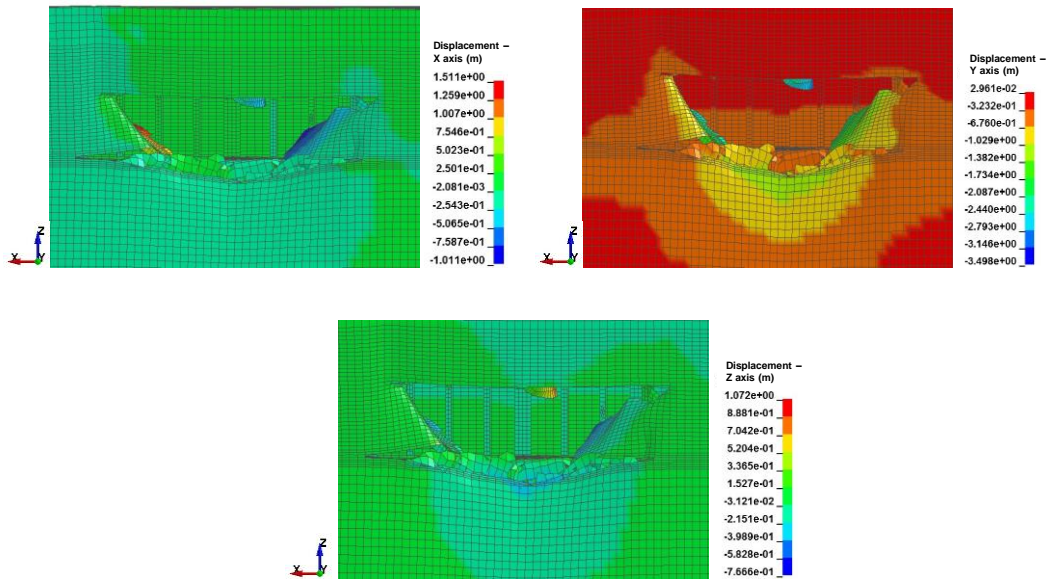


Gambar 6. Kerusakan pada lokasi no.2 di bagian struktur *fore-end*.

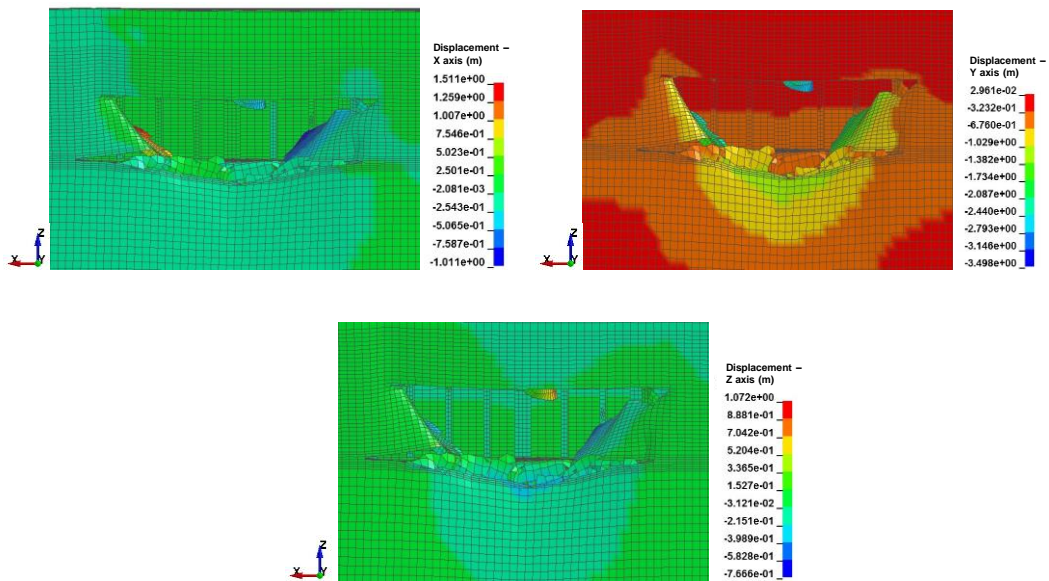
Dalam hal tingkat kerusakan setelah tubrukan, persebaran deformasi pada lambung kapal *struck ship* menunjukkan keparahan hingga pada *main deck* untuk lokasi *fore-end*. Seperti yang diberikan pada Gambar 5 dan 6, pada ujung *main deck*, kerusakan dalam bentuk robekan juga muncul, bersamaan dengan sobekan pada bagian lambung dibawah *middle deck*. Berlawanan dengan hasil yang ditunjukkan *fore-end*, kerusakan pada lambung bagian *midship* (Gambar 7 dan 8) tidak mencapai bagian atas (*main deck*) ataupun lebih rendah daripada *middle deck*.

Pererhatian selanjutnya ditujukan pada efek material baja di lambung kapal saat menghadapi tubrukan. Hasil pada gambar 9 menunjukkan bahwa perbedaan yang signifikan terjadi pada *low-carbon* dan *medium-carbon steel*.

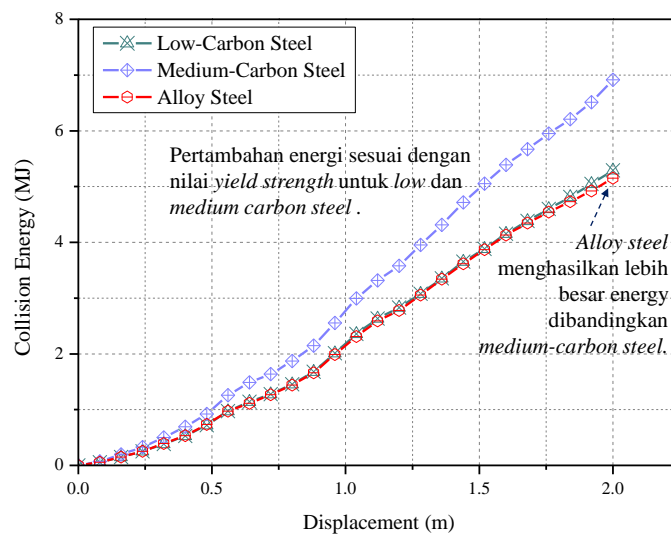
Dapat disimpulkan bahwa kenaikan nilai *yield strength* akan sebanding dengan kemampuan hambatan struktur dalam menghadapi tubrukan. Hal ini sesuai dengan teori material dimana baja dengan *yield* lebih tinggi akan lebih sulit dirusak saat kontak, yang lebih jauh pengaruh *yield* ini akan meningkatkan *impact resistance*. Akan tetapi, anomali terjadi pada *low alloy* yang menghasilkan energi lebih kecil daripada baja-karbon rendah, meskipun *low alloy* memiliki *yield* lebih tinggi. Temuan mengenai material baja menunjukkan bahwa pada saat perbedaan *yield* tidak signifikan, atau dibawah 1.587%, *density* akan mempengaruhi hasil kalkulasi energi. Lebih jauh, dapat disimpulkan bahwa volume material yang rusak akibat tubrukan juga akan lebih kecil meskipun suatu material memiliki *yield* lebih tinggi.



Gambar 7. Kerusakan pada lokasi no.3 di bagian struktur *midship*.



Gambar 8. Kerusakan pada lokasi no.4 di bagian struktur *midship*.



Gambar 9. Pola energi tubrukan untuk ketiga material yang digunakan pada analisa.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menyajikan sebuah studi mengenai investigasi beberapa kasus tubrukan kapal yang didesain agar mewakili internal dan eksternal parameter pada tubrukan kapal. Metode elemen hingga digunakan sebagai media kalkulasi skenario tubrukan. Konfigurasi dari metode ini berhasil diverifikasi dengan membandingkan dengan kasus tubrukan aktual dan formula empiris. Pada analisa kasus tahap lanjut, didapat bahwa pengaruh target lokasi secara keseluruhan menunjukkan perbedaan kapabilitas yang cukup signifikan dalam menghadapi beban impak. Namun perlu diperhatikan bahwa dalam observasi pada target lokasi yang sama (contoh: *fore-end* atau *midship*), perbedaan jarak sangat menentukan perilaku energi tubrukan. Agar pengamatan pada respon struktur dapat dilakukan dengan jelas, rekomendasi diberikan dalam hal penetapan jarak antar target. Pada lokasi yang sama, jarak ini harus diatas 2 meter. Mengenai parameter baja kapal, *density* akan berpengaruh pada energi tubrukan ketika perbedaan pada aspek *yield strength* tidak signifikan. *Review* pada studi yang membahas mengenai dampak properti baja terhadap subjek berbasis baja sangat disarankan untuk mendapat referensi yang relevan dalam mendefinisikan *material model* pada analisa tubrukan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] O. Kitamura, "FEM Approach to the Simulation of Collision and Grounding Damage," *Marine Structures*, vol. 15, pp. 403-428, 2002.
- [2] S. Haris, J. Amdahl, "Analysis of Ship-Ship Collision Damage Accounting For Bow and Side Deformation Interaction," *Marine Structures*, vol. 32, pp. 18-48, 2013.
- [3] A.R. Prabowo, D.M. Bae, J.M. Sohn, A.F. Zakki, B. Cao, J.H. Cho, "Effects of the Rebounding of a Striking Ship on Structural Crashworthiness during Ship-Ship Collision," *Thin-Walled Structures*, vol. 115, pp. 225-239, 2017.
- [4] A.R. Prabowo, D.M. Bae, J.H. Cho, J.M. Sohn, "Analysis of Structural Crashworthiness and Estimating Safety Limit Accounting for Ship Collisions on Strait Territory," *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 14, pp. 1594-1613, 2017.
- [5] D.M. Bae, A.R. Prabowo, B. Cao, J.M. Sohn, A.F. Zakki, Q. Wang, "Numerical Simulation for the Collision Between Side Structure and Level Ice in Event of Side Impact Scenario," *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 13, pp. 2991-3004, 2016.
- [6] A.R. Prabowo, B. Cao, D.M. Bae, S.Y. Bae, A.F. Zakki, J.M. Sohn, "Structural Analysis of the Double Bottom Structure During Ship Grounding by Finite Element Approach," *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 14, pp. 1-18, 2017.
- [7] A.R. Prabowo, S.J. Baek, H.J. Cho, J.H. Byeon, D.M. Bae, J.M. Sohn, "The Effectiveness of Thin-Walled Hull Structures Against Collision Impact," *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 14, pp. 1345-1360, 2017.
- [8] M.A.G. Calle, R.E. Oshiro, M. Alves, "Ship Collision and Grounding: Scaled Experiments and Numerical Analysis," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 103, pp. 195-210, 2017.
- [9] A.R. Prabowo, D.M. Bae, J.M. Sohn, J.H. Cho, "Performance Assessment on a Variety of Double Side Structure During Collision Interaction with Other Ship," *Curved and Layered Structures*, vol. 4, pp. 255-271, 2017.
- [10] S. Zhang, P.T. Pedersen, "A Method for Ship Collision Damage and Energy Absorption Analysis and Its Validation," *Ships and Offshore Structures*, vol. 12, pp. S11-S20, 2016.
- [11] D.M. Bae, A.R. Prabowo, B. Cao, A.F. Zakki, G.D. Haryadi, "Study on Collision Between Two Ships Using Selected Parameters in Collision Simulation," *Journal of Marine Science and Application*, vol. 15, pp. 63-72, 2016.
- [12] ANSYS, ANSYS LS-DYNA User's Guide, Pennsylvania: ANSYS, Inc., 2017.
- [13] A.R. Prabowo, D.M. Bae, J.M. Sohn, B. Cao, "Energy behavior on side structure in event of ship collision subjected to external parameters," *Heliyon*, vol. 2, e00192, 2016.