

Identifikasi Kerusakan *Debonding Ramp Door* Berbahan *Sandwich* pada Kapal Ro-Ro

Fikri Indra Mualim, Achmad Zubaydi, Tuswan, Abdi Ismail, dan Rizky Chandra Ariesta
Departemen Teknik Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: zubaydi@na.its.ac.id

Abstrak—Perkembangan teknologi material mendorong beragam inovasi dalam bidang kemaritiman, khususnya di industri perkapalan. Salah satunya adalah inovasi material sandwich sebagai upaya untuk meningkatkan kualitas konstruksi kapal. Material sandwich dapat diterapkan pada berbagai bagian konstruksi kapal seperti ramp door. Sebagai bagian konstruksi yang sering mengalami pembebanan maka konstruksi ramp door harus dibuat dengan kekuatan yang baik tetapi dengan berat konstruksi yang ringan untuk memudahkan operasionalnya. Sebagai material yang baru dikembangkan, material sandwich juga memiliki kekurangan salah satunya adalah lepasnya ikatan antara material core dan face plate atau dikenal dengan sebutan debonding. Kerusakan ini dapat mempengaruhi kekakuan struktur yang berdampak pada berkurangnya kekuatan ramp door. Pengaruh debonding dapat diidentifikasi dengan melakukan pengujian numerik menggunakan metode elemen hingga. Pengujian ini bertujuan untuk mengidentifikasi respon dinamis yang terjadi pada ramp door akibat pengaruh dari kerusakan debonding yang terjadi. Penelitian ini menggunakan metode elemen hingga dengan metode static frequency untuk mengetahui respon dinamis ramp door. Berdasarkan hasil pengujian dengan metode elemen hingga menunjukkan bahwa kerusakan debonding menurunkan kekakuan struktur. Sedangkan untuk lokasi yang paling sensitif jika terjadi kerusakan terdapat pada bagian permukaan bawah core atas dengan penurunan frekuensi natural mencapai 28,058%.

Kata Kunci—*Debonding, Sandwich, Frekuensi Natural, Modal Dynamic.*

I. PENDAHULUAN

PERKEMBANGAN teknologi memberikan pengaruh besar terhadap berbagai bidang termasuk industri perkapalan. Pada industri perkapalan, inovasi dalam teknologi material terus berkembang. Salah satunya adalah penggunaan material sandwich untuk sistem konstruksi kapal. Penggunaan material sandwich khususnya yang menggunakan komposit memiliki banyak keunggulan seperti penyerapan energi yang baik dan ketahanan terhadap gaya. Jika diaplikasikan pada area yang luas, penggunaan material sandwich juga dapat mengurangi berat pada struktur konstruksi kapal [1] salah satunya dengan pengurangan jumlah penegar yang terdapat pada konstruksi dengan material sandwich [2].

Walau banyak keunggulan tetapi material sandwich dapat mengalami kerusakan berupa lepasnya ikatan antara face plate dengan core atau bisa disebut debonding. Kerusakan debonding yang dapat terjadi pada proses manufaktur akibat tingginya tingkat kerumitan proses pembuatan material sandwich [3]. Selain itu kerusakan debonding juga dapat disebabkan karena ketidakcocokan antara material face plate dengan core, rendahnya karakteristik lapisan adhesif, maupun akibat kondisi pembebanan dinamis yang terjadi [4].

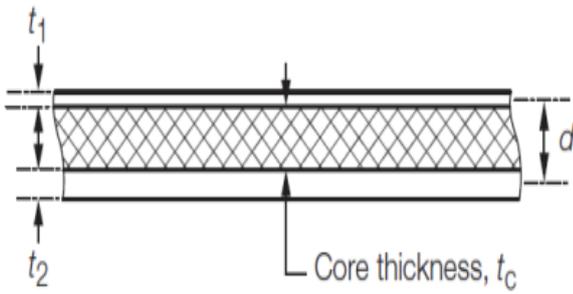
Kerusakan debonding jika dapat menjadi pemicu dari kerusakan lainnya seperti terjadinya interfacial cracks dengan ukuran yang relatif besar yang terjadi pada core yang terdapat pada material sandwich [5].

Melihat besarnya dampak yang dapat ditimbulkan maka perlu dilakukannya pengujian akibat pengaruh kerusakan debonding terhadap struktur ramp door. Terlebih konstruksi ramp door merupakan bagian kapal yang sering mendapatkan kondisi pembebanan dinamis. Pengaruh dampak kerusakan debonding terhadap struktur dapat dilihat dari respon dinamis yang terjadi pada struktur. Hal ini dapat dilakukan dengan melakukan identifikasi kerusakan berbasis getaran. Metode ini efektif digunakan untuk mendeteksi pengaruh kerusakan pada struktur kapal dengan area yang lebih luas [6]. Pengujian ini dapat dilakukan dengan menggunakan software berbasis elemen hingga. Untuk meningkatkan akurasi dari hasil pengujian menggunakan software berbasis elemen hingga ini digunakan spring element untuk interaksi antara face plate dengan core yang terdapat pada area kerusakan debonding [7]. Dengan didasari hal tersebut di atas maka dalam penelitian ini akan diidentifikasi pengaruh lokasi kerusakan debonding terhadap karakteristik dinamis struktur ramp door.

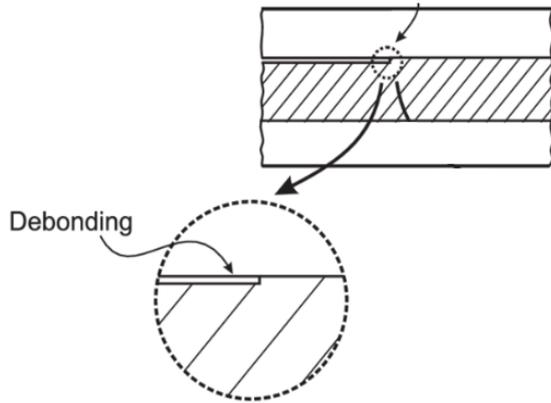
II. STUDI LITERATUR

A. *Sandwich Core Materials*

Sandwich plate system (SPS) merupakan sebuah sistem pelat di mana terdapat 2 buah material pelat kaku yang dipisahkan oleh material inti yang memiliki karakteristik yang lebih ringan [5]. Sebelum membuat sebuah *sandwich plate* perlu untuk terlebih dahulu melakukan pengujian terhadap material *core* yang akan digunakan agar memenuhi syarat kelayakan. Salah satu yang pedoman yang dapat dijadikan acuan dalam menentukan material *core* adalah peraturan yang dikeluarkan oleh Lloyd's Register. Menurut Ramakrishnan & Kumar terdapat beberapa pilihan material yang dapat dijadikan sebagai material *core* pada *sandwich plate* seperti kayu, *foam*, dan juga *honeycomb* [8]. Pada penelitian ini material *core* yang digunakan merupakan jenis *foam*. Penggunaan material *core* berupa *foam* ini merujuk kepada penelitian yang dilakukan oleh Abdullah et al. [9]. Pada penelitiannya, Abdullah et al. membuat *sandwich plate system* dengan *face plate* menggunakan baja dan *core* berupa campuran resin dengan serbuk cangkang kerang (*Anadara granosa*) [9]. Setelah melakukan percobaan dengan komposisi serbuk cangkang kerang sebesar 0%, 10%, 20% 30%, dan 40%, didapatkan hasil paling optimal dimiliki oleh campuran resin dengan 30% serbuk cangkang kerang. Karakteristik campuran tersebut juga memenuhi persyaratan yang disyaratkan oleh Lloyd's Register. Sehingga pada



Gambar 1. Bentuk steel sandwich panel.



Gambar 2. Ilustrasi kerusakan debonding pada sandwich plate system.

penelitian ini menggunakan material core berupa campuran resin dengan 30% serbuk cangkang kerang.

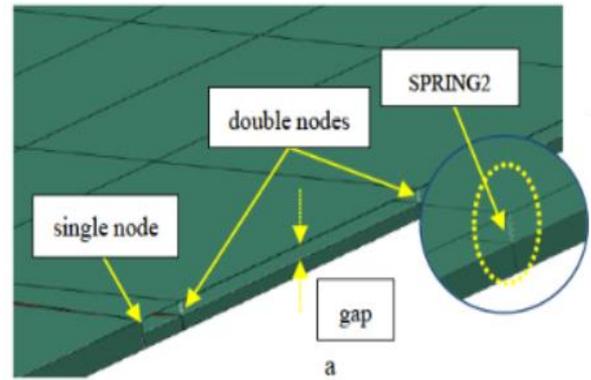
B. Sandwich Plate System (SPS) Pada Konstruksi Kapal

Pada konstruksi kapal biasanya material yang digunakan adalah baja. Tetapi pada sandwich plate system (SPS) baja hanya merupakan salah satu dari material penyusun. Selain itu pada sistem ini juga terdapat perimeter bar pada sisi-sisi pelat yang sekaligus menjadi penghubung antar pelat [10]. Material core dari SPS ini kebanyakan terbuat dari elastomer polyurethane yang telah melalui proses pematangan. Adanya core di antara 2 buah pelat ini meningkatkan momen inersia SPS yang berfungsi untuk menahan beban bending dan buckling dengan kenaikan berat struktur yang kecil [5]. Selain itu core juga berfungsi memberikan kekuatan pada struktur melalui ikatan pada pelat yang berdampak pada berkurangnya kebutuhan terhadap penegar [8].

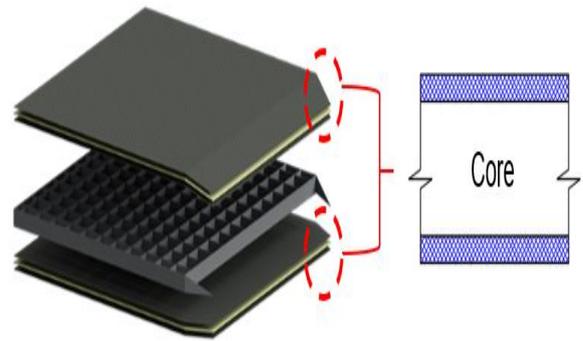
Lloyd's Register juga memberikan definisi terhadap steel sandwich panel. Berdasarkan dari definisi yang dikeluarkan oleh Lloyd's Register steel sandwich panel merupakan sebuah panel yang terdiri atas 3 lapisan dengan konfigurasi: top plate-core-bottom plate [11]. Penjelasan ini digambarkan pada Gambar 1.

C. Kerusakan Debonding Pada Sandwich Plate System (SPS)

Kesalahan manufaktur jadi salah satu hal yang dapat menyebabkan kerusakan debonding. Selain itu material dengan material properties yang kurang baik, pilihan penggunaan adhesif yang tidak tepat, dan beragam faktor lainnya. Selain itu sandwich plate yang mengalami kondisi pembebanan dinamis juga sangat memungkinkan mengalami kerusakan debonding. Selain itu kerusakan debonding juga



Gambar 3. Penggunaan spring element pada pemodelan kerusakan debonding.



Gambar 4. Model ramp door yang telah menggunakan konstruksi sandwich.

dapat disebabkan oleh ketidakcocokan antara face plate dan core seperti terlalu besarnya perbedaan ketebalan atau nilai modulus elastisitas pada masing-masing material [7]. Gambar 2 memperlihatkan bagaimana kondisi sandwich plate yang mengalami kerusakan.

D. Frekuensi Natural

Frekuensi natural atau sering disebut sebagai frekuensi getaran bebas merupakan frekuensi yang terjadi akibat gaya yang berasal dari sistem itu sendiri. Untuk mengetahui frekuensi natural dari suatu sistem maka akan dilakukan pengujian dengan membiarkan sistem tersebut bergetar dengan sendirinya tanpa adanya redaman. Secara matematis frekuensi natural dapat didefinisikan lewat persamaan berikut:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ atau } \tag{1}$$

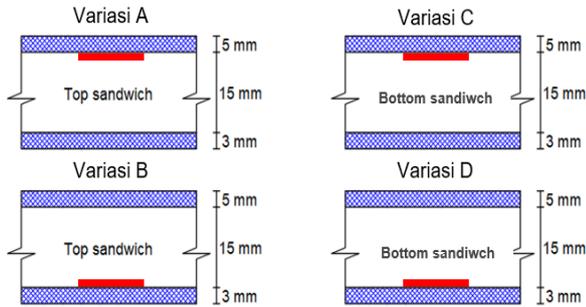
Setiap sistem memiliki frekuensi naturalnya masing-masing. Pada sebuah struktur, penting untuk mengetahui nilai frekuensi alaminya untuk menghindari terjadinya resonansi akibat frekuensi beban yang terjadi [12]. Resonansi sendiri memberikan pengaruh negatif terhadap struktur karena dapat menyebabkan kerusakan. Sehingga apabila suatu struktur telah diketahui nilai frekuensi naturalnya maka struktur tersebut harus dihindarkan dari beban yang memiliki besaran frekuensi mendekati dari nilai frekuensi natural struktur tersebut agar tidak terjadi resonansi.

E. Pengaplikasian Spring Element pada Pemodelan Kerusakan Debonding

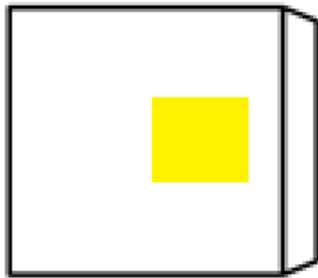
Penggunaan spring element pada pemodelan kerusakan debonding bertujuan untuk menghubungkan antar elemen

Tabel 1.
Data Hasil Uji Statis Variasi Model Ramp Door Berbahan Sandwich.

Model	σ Mpa	U mm
Model A	32.39	0.0007
Model B	34.5	0.0008
Model C	36.02	0.0009
Model D	45.93	0.0011
Model E	58.57	0.0026
Existing	47.66	0.0011



Gambar 5. Variasi lokasi kerusakan *debonding* pada *ramp door* berbahan *sandwich*.



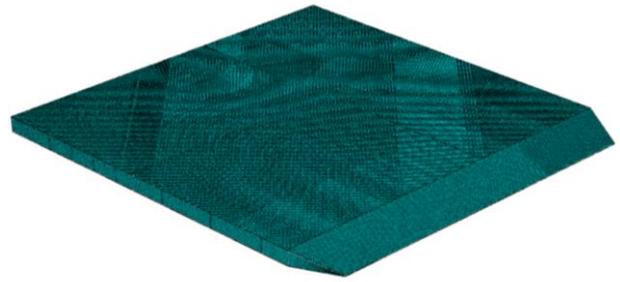
Gambar 6. Tampak atas letak kerusakan *debonding* pada *ramp door*.

yang ada pada *face plate* dengan elemen yang ada pada *core*. Metode ini menggunakan *multi-point constrains* (MPS) untuk menghubungkan *node* yang ada pada elemen-elemen tersebut. Penggunaan *spring element* ini untuk meningkatkan interaksi elemen-elemen yang ada pada area kerusakan *debonding* akibat lemahnya adhesi antar elemen pada area tersebut. Agar tidak terjadi tumpang tindih pada material *face plate* dengan *core* makan pada elemen pegas 3D SPRING2 menggunakan *node ganda* pada area kerusakan *debonding* seperti terlihat pada Gambar 3.

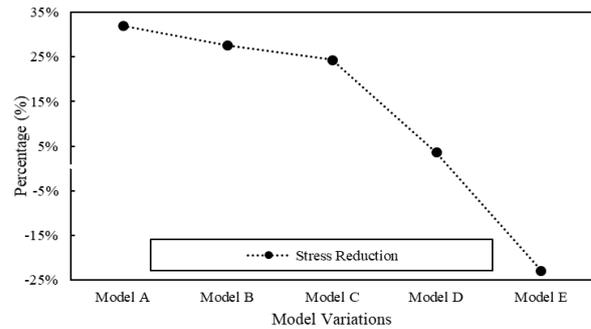
III. METODOLOGI

A. Konstruksi Ramp Door

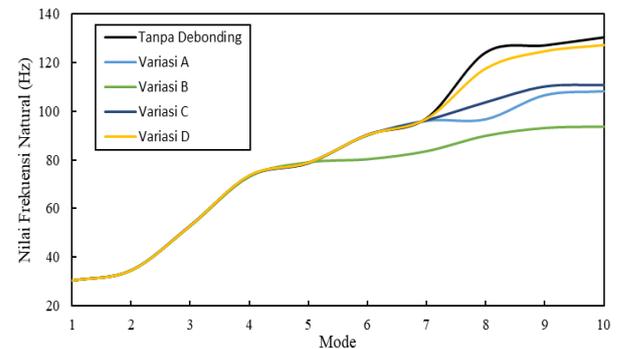
Ramp door yang digunakan dalam penelitian ini merujuk kepada *ramp door* yang digunakan pada penelitian yang dilakukan Tuswan dengan menggunakan *ramp door* dari kapal ro-ro 6311 GT [13]. Konstruksi *ramp door* yang masih menggunakan konstruksi konvensional tersebut diubah menjadi konstruksi *sandwich*. Proses perubahan ini menggunakan peraturan yang dikeluarkan oleh klas yang dalam penelitian ini digunakan peraturan dari Lloyd's Register. Setelah diubah menjadi model *ramp door* dengan konstruksi *sandwich* lalu dibuat beberapa model dengan variasi jumlah penegar. Model yang paling optimal digunakan pada penelitian ini dengan 2 kriteria, yaitu persentase pengurangan berat dan pengurangan tegangan.



Gambar 7. Model yang telah diaplikasikan *spring element*.



Gambar 8. Persentase pengurangan nilai tegangan masing-masing model *ramp door*.



Gambar 9. Nilai frekuensi natural masing-masing variasi lokasi kerusakan.

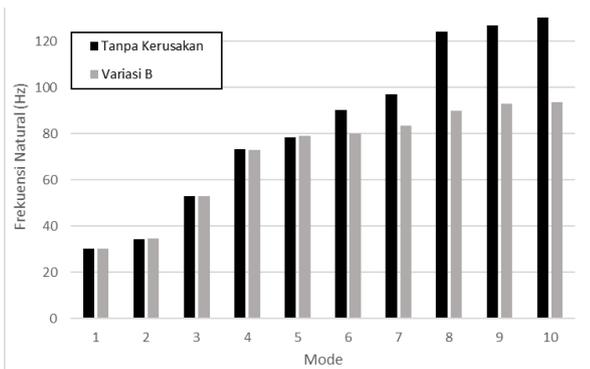
Selain itu model dengan konstruksi *sandwich* juga harus memenuhi tegangan izin yang diberikan oleh klas. Hasil dari pengujian statis yang telah dilakukan [13] dapat dilihat pada Tabel 1.

B. Pemodelan Ramp Door Pada Software Berbasis Elemen Hingga

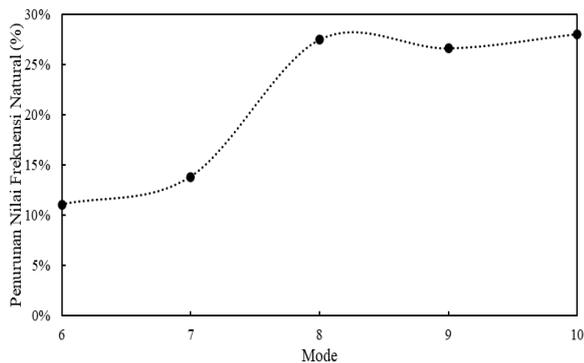
Setelah variasi model yang dibuat memenuhi semua persyaratan maka akan dilakukan pemodelan *ramp door* yang menggunakan konstruksi *sandwich*. Gambar 4 memperlihatkan konstruksi *ramp door* yang telah menggunakan pelat *sandwich*.

Konstruksi *sandwich* yang digunakan dalam penelitian ini memiliki konfigurasi ketebalan *face plate* atas setebal 5 mm, ketebalan *core* setebal 15 mm, dan ketebalan *face plate* bawah setebal 3 mm. Konfigurasi ini berlaku sama untuk *sandwich plate* bagian atas dan bawah.

Pada pemodelan ini bagian *face plate* didefinisikan dengan *shell shape* bertipe *planar*. Sedangkan untuk bagian *core* dan penegar didefinisikan sebagai *solid shape* dengan tipe *extrusion*. Selanjutnya pada tiap-tiap *part* juga akan dimasukkan nilai *material properties* seperti massa jenis, modulus Young dan rasio Poisson. Kemudian seluruh *part*



Gambar 10. Perbandingan nilai frekuensi natural antara model tanpa kerusakan dengan Variasi B.



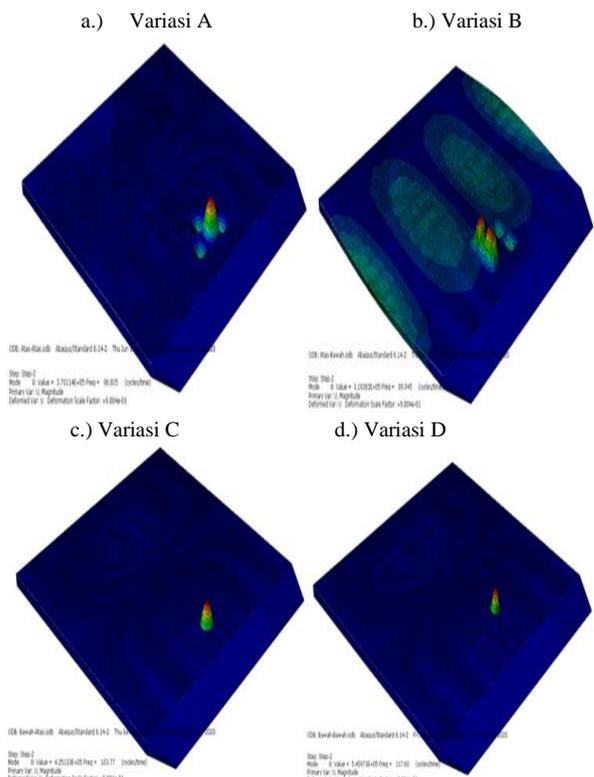
Gambar 11. Besar persentase penurunan nilai natural frekuensi Variasi B pada mode 6-10.

akan digabung pada tahap *assembly* untuk selanjutnya diberikan *constraint*. Terdapat 3 interaksi yang digunakan, yaitu *node-to-node tie constraint* (NN), *node-to-surface tie constraint* (NS), dan *surface-to-surface tie constraint* (SS). Penggunaan dari masing-masing interaksi tersebut didasarkan kepada definisi dari tiap-tiap part yang berinteraksi. Untuk interaksi antara permukaan *face plate* dengan penegar menggunakan tipe NS dan interaksi antara permukaan *face plate* dengan *core* menggunakan tipe SS. Sedangkan tipe NN digunakan pada garis-garis yang saling bersinggungan.

Pada pemodelan ini *ramp door* juga diberikan kondisi batas berupa tumpuan jepit pada ujung depan dan belakang dengan asumsi *ramp door* sedang dalam posisi terbukan saat *loading/unloading* kendaraan. Selanjutnya dilakukan proses *meshing* dengan bentuk elemen *quad-structured*. Elemen ini dipilih karena bentuk dari elemen *ramp door* yang kebanyakan berbentuk balok. Tahap selanjutnya adalah mengatur *step* atau langkah yang akan dilakukan untuk simulasi. Pada penelitian ini *step* yang diberikan adalah *frequency step* yang bertujuan untuk mengetahui respon dinamis *ramp door* berupa nilai frekuensi naturalnya.

C. Pemodelan Kerusakan *Debonding*

Terdapat 4 variasi lokasi kerusakan *debonding* yang dibuat pada *ramp door*. Variasi A merupakan kerusakan *debonding* pada bagian atas *top sandwich*. Variasi B merupakan kerusakan *debonding* pada bagian bawah *top sandwich*. Variasi C merupakan kerusakan *debonding* pada bagian atas *bottom sandwich*. Variasi D merupakan kerusakan *debonding* pada bagian bawah *bottom sandwich*. Ilustrasi variasi lokasi kerusakan *debonding* tersebut ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 12. Bentuk *mode shape* pada mode ke-8.

Sedangkan untuk kerusakan *debonding* yang digunakan sebesar 10% dari ketebalan *core* atau setebal 1,5 mm. Untuk luas area kerusakan *debonding* yang digunakan sebesar 1,85×1,85 m dengan lokasi seperti digambarkan pada Gambar 6.

D. Penerapan *Spring Element* Pada Kerusakan *Debonding*

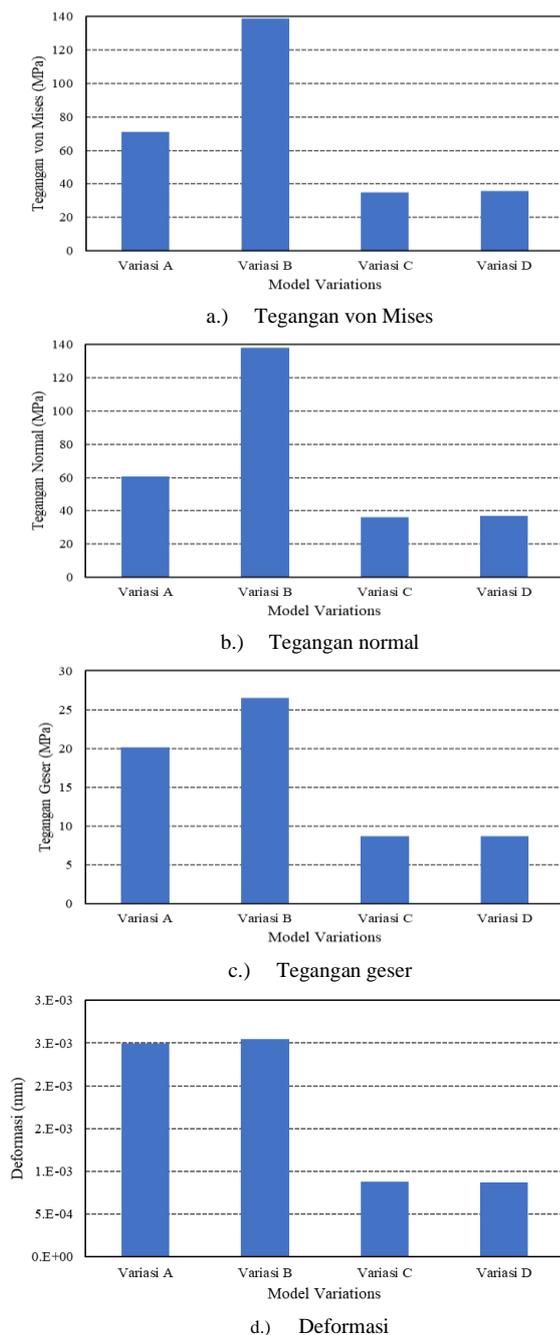
Pada pemodelan kerusakan *debonding* yang dilakukan menggunakan *spring element*. Penggunaan *spring element* ini dilakukan pada *core* yang mengalami *debonding* dengan permukaan *face plate* yang berinteraksi dengan kerusakan tersebut. Penerapan ini bertujuan untuk meningkatkan ketelitian hasil pengujian pada *software* berbasis elemen hingga. Interaksi antara *core* dengan *face plate* yang dihubungkan dengan *spring element* dapat dilihat pada Gambar 7

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Statis Model

Analisis statis ini bertujuan untuk menentukan model konstruksi *ramp door* berbahan *sandwich* yang paling optimal. Hal tersebut ditentukan berdasarkan pengurangan tegangan dan pengurangan berat yang terjadi. Digunakan 5 model *ramp door* dengan konstruksi *sandwich* yang akan dilakukan uji statis pada penelitian ini. Nilai yang digunakan sebagai tolok ukur adalah nilai tegangan dan berat dari struktur *ramp door* konvensional sebelum dilakukannya penambahan pelat *sandwich* [14].

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Tuswan et al. maka didapat data hasil uji statis seperti yang telah ditunjukkan pada Tabel 1 [14]. Dari hasil uji statis yang dilakukan dengan menggunakan *software* berbasis elemen hingga didapatkan nilai tegangan dari masing-masing variasi



Gambar 13. Nilai tegangan dan deformasi masing-masing model dengan variasi lokasi kerusakan.

model yaitu tegangan von Mises, tegangan normal, dan tegangan geser. Sedangkan untuk perhitungan berat struktur dilakukan secara terpisah. Untuk persentase pengurangan nilai tegangan yang terjadi pada tiap modelnya dapat dilihat pada Gambar 8.

B. Hasil Konvergensi

Analisis konvergensi dibutuhkan untuk mendapatkan besar ukuran *mesh* sebelum dilakukannya proses simulasi numerik. Ketepatan ukuran *mesh* akan meningkatkan akurasi dari proses simulasi numerik yang dilakukan. Selain itu ukuran *mesh* yang tepat akan membuat proses simulasi menjadi lebih efisien dari segi waktu. Pada penelitian ini dilakukan analisis konvergensi dengan melakukan simulasi statis pada Model C yang dipilih sebagai model optimal untuk dilakukan pengujian. *Meshing* dilakukan pada keseluruhan konstruksi *ramp door* dengan rentang ukuran 0,1 m sampai dengan 0,03

m. Nilai tegangan von Mises dan besarnya deformasi menjadi acuan dari proses analisis konvergensi ini [14].

Dari hasil simulai yang telah dilakukan ukuran *mesh* sebesar 0,05 m sudah terjadi konvergensi antara nilai tegangan von Mises dan juga besar deformasi [14]. Tapi pada penelitian ini dilakukan beberapa penyesuaian untuk beberapa bagian *ramp door* agar mendapatkan hasil uji yang lebih akurat. Penyesuaian tersebut dilakukan pada beberapa bagian *ramp door* dengan masing-masing memiliki pertimbangan khusus seperti lokasi, bentuk, dan juga interaksi yang terjadi pada bagian tersebut. Beberapa penyesuaian tersebut dilakukan pada *face plate* atas dengan ukuran *mesh* 0,04, bagian penegar dengan ukuran *mesh* sebesar 0,03, dan bagian pelat segitiga dengan *mesh* berukuran 0,02 m. Sehingga total elemen yang dimiliki pada model sebanyak 241.309 buah dengan *nodes* berjumlah 315.324.

C. Pengaruh Lokasi Kerusakan Terhadap Respon Dinamis

Terdapat 4 variasi lokasi kerusakan yang dilakukan dalam penelitian ini. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui respon dinamis antara model dengan lokasi kerusakan yang berbeda dengan mengukur nilai frekuensi natural yang terjadi menggunakan *software* berbasis elemen hingga terhadap 4 variasi lokasi kerusakan *debonding* yang terjadi dengan menggunakan 10 mode frekuensi. Besarnya perubahan Dari hasil simulasi didapatkan nilai frekuensi natural dari masing-masing variasi model. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan 10 mode frekuensi dengan besarnya perubahan yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 9.

Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa perubahan signifikan terjadi pada mode ke-8. Sedangkan perubahan frekuensi natural pada Variasi B yang signifikan terjadi sejak mode ke-6. Hal tersebut menunjukkan bahwa Variasi B menjadi model yang memiliki sensitivitas paling tinggi dibandingkan variasi lainnya. Penurunan frekuensi natural paling besar juga dialami oleh Variasi B. Dibandingkan dengan model yang tanpa kerusakan, Variasi B memiliki penurunan nilai frekuensi natural 11,052% pada mode ke-6, 13,839% pada mode ke-7, 27,449% pada mode ke-8, 26,632% pada mode ke-9, dan 28,058% pada mode ke-10. Tren penurunan nilai frekuensi natural ini dapat dilihat pada Gambar 10-11.

Gambar 11 grafik tersebut menunjukkan bahwa lokasi kerusakan *debonding* yang berada pada permukaan bagian bawah *core* atas memiliki sensitivitas yang tinggi dibandingkan kerusakan *debonding* yang terjadi pada lokasi lainnya. Gambar 12 memperlihatkan hasil simulasi dengan *software* berbasis elemen hingga yang menunjukkan *mode shape* yang terjadi. Pada mode ke-8 di saat semua variasi mengalami perubahan nilai frekuensi natural secara signifikan terlihat bahwa karakter *mode shape* dari Variasi B memiliki kecenderungan bentuk yang lebih ekstrem dibandingkan variasi lainnya. *Mode shape* ini menunjukkan bentuk yang getaran yang terjadi akibat frekuensi natural dari struktur.

D. Pengaruh Lokasi Kerusakan Terhadap Tegangan dan Deformasi

Penurunan frekuensi ini juga menyebabkan berkurangnya kekakuan struktur. Pengurangan dari kekakuan struktur ini

menyebabkan tingginya nilai tegangan yang terjadi pada struktur tersebut.

Perbedaan besar nilai tegangan dan deformasi yang terjadi pada model dengan variasi kerusakan ini dapat dilihat pada Gambar 13. Dari grafik gambar 13 terlihat bahwa model dengan kerusakan *debonding* pada *core* atas memiliki deformasi yang lebih besar dibandingkan dengan model yang memiliki kerusakan *debonding* pada *core* bawah. Besarnya deformasi yang terjadi pada model dengan lokasi kerusakan pada *core* atas sebesar 291% atau hampir 3 kali lebih besar dari nilai deformasi yang terjadi pada model dengan variasi lokasi kerusakan *debonding* pada *core* bawah.

Sedangkan untuk nilai tegangan yang terjadi dapat terlihat perbedaan cukup besar antara model dengan kerusakan *debonding* pada *core* atas dengan model yang mengalami kerusakan *debonding* pada *core* bawah. Salah satu contohnya terlihat dari nilai tegangan von Mises yang terjadi. Variasi C dan D yang memiliki kerusakan *debonding* pada *core* bawah secara beturut-turut memiliki nilai tegangan von Mises sebesar 34,88 MPa dan 35,61 MPa. Sedangkan pada Variasi A nilai tegangan von Mises yang terjadi sebesar 71,23 MPa atau meningkat sebesar 49% dibandingkan nilai rata-rata tegangan yang terjadi pada Variasi C dan D.

Perbedaan signifikan terjadi pada nilai tegangan yang dimiliki Variasi B. Besar nilai tegangan von Mises yang terjadi sebesar 138,70 MPa. Nilai ini 1,95 kali lebih besar dari nilai tegangan von Mises pada Variasi A. Meski lokasi kerusakan *debonding* yang terjadi sama-sama berlokasi pada *core* atas tetapi seperti yang diketahui dari Gambar 9 bahwa Variasi B memiliki nilai frekuensi natural yang lebih rendah dibandingkan variasi lainnya. Jika dibandingkan dengan nilai tegangan model *ramp door* tanpa kerusakan, maka nilai dari tegangan von Mises pada Variasi B bernilai hampir 4 kali lebih besar.

Tetapi besarnya perbedaan nilai tegangan antara Variasi A dan B tidak terjadi pada nilai deformasi. Hal ini disebabkan pada Variasi B terdapat penegar yang menahan *core* untuk berinteraksi dengan *face plate* bagian bawah sehingga terjadi *gap* yang menyebabkan kekakuan struktur berkurang sehingga menyebabkan tingginya nilai tegangan. Berbeda dengan Variasi A yang mana *gap* yang terjadi dapat diisi semaksimal mungkin untuk mempertahankan kekakuan struktur.

V. KESIMPULAN

Lokasi kerusakan yang paling sensitif terdapat pada permukaan bagian bawah *core* atas dengan penurunan frekuensi dibandingkan *ramp door* tanpa kerusakan hingga sebesar 28,058% pada mode ke-10 sedangkan lokasi kerusakan yang paling sedikit mendapatkan pengaruh terdapat pada permukaan bagian bawah *core* bawah dengan penurunan frekuensi natural hanya sebesar 5%.

Penurunan frekuensi natural pada *ramp door* akibat kerusakan *debonding* yang terjadi menyebabkan berkurangnya kekakuan struktur *ramp door*. Variasi B menjadi model variasi yang memiliki pengurangan kekakuan paling besar. Hal ini didasari dengan tingginya nilai tegangan yang terjadi. Nilai tegangan von Mises yang dimiliki Variasi B sebesar 138,70 MPa. Nilai tegangan ini 3,85 kali lebih besar dibandingkan dengan nilai tegangan yang terjadi pada *ramp door* sebelum adanya kerusakan *debonding*. Besarnya deformasi yang dihasilkan juga 2,8 kali lebih besar dari 0,0009 m pada kondisi sebelum adanya kerusakan *debonding* menjadi 0,00255 m pada Variasi B.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Chen, S. Hou, K. Fu, X. Han, and L. Ye, "Low-velocity impact response of composite sandwich structures: Modelling and experiment," *Compos. Struct.*, vol. 168, pp. 322–334, 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.02.064.
- [2] T. Tuswan, K. Abdullah, A. Zubaydi, and A. Budipriyanto, "Finite-element analysis for structural strength assessment of marine sandwich material on ship side-shell structure," in *Materials Today: Proceedings*, Jan. 2019, vol. 13, pp. 109–114, doi: 10.1016/j.matpr.2019.03.197.
- [3] J. B. Tomblin, T. Lacy, B. J. Smith, R. S Hooper, A. J. Vizzini, and S. Lee, *Review of Damage Tolerance for Composite Sandwich Airframe Structures*. Washington D.C.: Department of Transportation Federal Aviation Administration, 1999.
- [4] M. F. Funari, F. Greco, and P. Lonetti, "Sandwich panels under interfacial debonding mechanisms," *Compos. Struct.*, vol. 203, pp. 310–320, 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.06.113.
- [5] T. C. Triantafillou and L. J. Gibson, "Debonding in foam-core sandwich panels," *Mater. Struct.*, vol. 22, no. 1, pp. 64–69, 1989, doi: 10.1007/BF02472697.
- [6] A. Budipriyanto, M. R. Haddara, and A. S. J. Swamidias, "Identification of damage on ship's cross stiffened plate panels using vibration response," *Ocean Eng.*, vol. 34, no. 5–6, pp. 709–716, 2007, doi: 10.1016/j.oceaneng.2006.05.009.
- [7] V. N. Burlayenko and T. Sadowski, "Influence of skin/core debonding on free vibration behavior of foam and honeycomb cored sandwich plates," *Int. J. Non. Linear. Mech.*, vol. 45, no. 10, pp. 959–968, 2010, doi: 10.1016/j.ijnonlinmec.2009.07.002.
- [8] K. Ramakrishnan and P. S Kumar, "Application of sandwich plate system for ship structures," in *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2016, pp. 83–90.
- [9] K. Abdullah, A. Zubaydi, and A. Budipriyanto, "Development Of sandwich panel with core from clamshell powder for ship structure," in *SENTA 2017 - International Conference on Marine Technology*, 2017, pp. 53–60.
- [10] N. Momcilovic and M. Motok, "Estimation of ship lightweight reduction by means of application of sandwich plate system," *FME Trans.*, vol. 37, no. 3, pp. 123–128, 2009.
- [11] L. Register, "Provisional rules for the application of sandwich panel construction to ship structure." United Kingdom, 2015.
- [12] E. Wahyuni, "Studi kelakuan dinamis struktur jembatan penyeberangan orang (jpo) akibat beban individual manusia bergerak," *J. Tek. Sipil*, vol. 19, no. 3, pp. 181–194, 2012, doi: 10.5614/jts.2012.19.3.1.
- [13] Tuswan *et al.*, "Influence of application of sandwich panel on static and dynamic behavior of ferry ro-ro ramp door," 2020.
- [14] Tuswan, A. Zubaydi, B. Pisceca, and A. Ismail, "Dynamic characteristic of partially debonded sandwich of ferry ro-ro's car deck: A numerical modeling," *Open Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 424–433, 2020, doi: 10.1515/eng-2020-0051.