

Perbandingan Respon Dinamis Terhadap Variasi Rasio Kerusakan *Debonding* Material *Sandwich* pada *Rampdoor* Kapal Penumpang

Muhammad Fathi Ilham, 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—Saat ini, penggunaan material *sandwich* pada konstruksi kapal sudah mulai digunakan. Karakter material *sandwich* yang ringan, dapat mengurangi berat konstruksi. Khususnya pada penggunaan *rampdoor*. Namun untuk saat ini penggunaan material *sandwich* pada konstruksi kapal masih perlu dikembangkan terutama pada identifikasi adanya kerusakan *debonding*. Kerusakan *debonding* dapat menyebabkan kegagalan struktur dibawah tegangan desain yang telah direncanakan. Dalam tugas akhir ini, akan dianalisa karakteristik respon dinamis konstruksi *sandwich* pada *rampdoor* kapal penumpang yang dipelajari dengan menggunakan perangkat lunak elemen hingga. Efek dari adanya kerusakan *debonding* pada *rampdoor* kapal penumpang dinilai dengan membandingkan perubahan *natural frequency* dari konstruksi yang utuh dengan konstruksi yang mengalami kerusakan berupa *debonding*. Penulis akan menganalisa pengaruh dari variasi rasio kerusakan *debonding* sebesar 2,5%, 5%, dan 7,5% yang terjadi pada konstruksi *sandwich*. Pemodelan dilakukan dengan dua kondisi yang berbeda yaitu pemodelan dengan pengaplikasian *spring element* dan tanpa pengaplikasian *spring element* pada permukaan terjadinya kerusakan *debonding*. Hal ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh dari teknik pemodelan untuk memverifikasi keakuratan model dengan konstruksi sebenarnya. Dari hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa kerusakan *debonding* menyebabkan penurunan *natural frequency* diakibatkan karena berkurangnya kekakuan model. Penurunan nilai *natural frequency* sangat signifikan pada mode tinggi, namun tidak signifikan pada mode rendah. Semakin besar rasio kerusakan *debonding* menyebabkan terjadinya penurunan *natural frequency* yang besar. Pemodelan *debonding* tanpa pengaplikasian *spring element* menghasilkan penurunan nilai *natural frequency* yang signifikan bahkan pada mode rendah.

Kata Kunci—*Debonding*, *Natural Frequency*, *Sandwich*, *Spring Element*.

I. PENDAHULUAN

PADA saat ini, persaingan inovasi dan pengembangan dalam bidang konstruksi sangat pesat. Tidak terkecuali pada bidang konstruksi kapal. Pada umumnya kapal menggunakan konstruksi berupa baja sebagai material utamanya. Pengurangan berat terhadap konstruksi kapal dapat berkontribusi untuk meningkatkan berat muatan kapal (*payload*), sehingga dapat meningkatkan jumlah muatan yang dapat diangkut oleh kapal [1]. Oleh karena itu kini dilakukan pengembangan inovasi terhadap material *sandwich* sebagai alternatif material pelat baja dalam konstruksi kapal.

Material *sandwich* merupakan material yang memiliki keunggulan jika dibandingkan dengan material pelat baja antara lain yaitu dapat mengurangi kebutuhan penegar atau *stiffener* sehingga memiliki berat yang jauh lebih ringan [2] [3]. Penggunaan material *sandwich* pada kapal juga masih

rentan terhadap kerusakan. Kerusakan pada material *sandwich* biasanya terjadi akibat kesalahan dalam proses manufaktur. Hal ini disebabkan pembuatan material *sandwich* memerlukan proses manufaktur yang rumit untuk membuat struktur *sandwich* yang mempunyai kualitas tinggi [4]. Kesalahan pada proses manufaktur, sangat memungkinkan terjadinya kerusakan berupa *debonding*. *Debonding* adalah kerusakan yang terjadi akibat terlepasnya material kulit (*face plate*) dengan material inti (*core*). Selain itu kerusakan *debonding* juga dapat disebabkan oleh perbedaan ketebalan dan modulus elastis yang besar antara lapisan *face plate* dan *core*, serta kurangnya ikatan *adhesive layer* antara material *face plate* dan *core* [5].

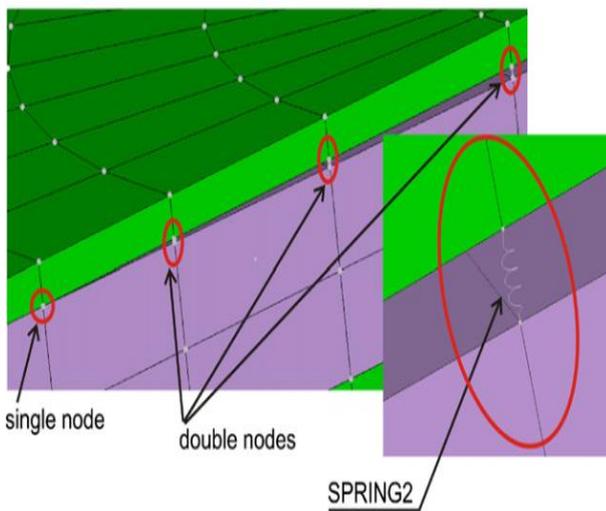
Metode identifikasi kerusakan yang bisa diaplikasikan terhadap kerusakan struktur kapal secara global salah satunya adalah dengan metode identifikasi berbasis getaran. Metode ini menggunakan perubahan respon dinamis sebagai acuan untuk mengidentifikasi kerusakan yang terjadi pada struktur. Parameter respon dinamis seperti frekuensi alami (*natural frequency*) dan bentuk mode (*mode shape*) dapat ditemukan dengan metode *Finite Element Analysis*. Perubahan *natural frequency* dapat digunakan untuk mendeteksi pelat yang mengalami *debonding* [6]. Pada simulasi numerik, tingkat keakuratan hasil ditentukan dengan pemodelan dan konvergensi. Salah satu metode pemodelan yang digunakan untuk mendekati kondisi sebenarnya adalah dengan mengaplikasikan penggunaan *spring element* pada interkasi antara *face plate* dan *core* pada zona *debonding* [7].

Oleh karena itu pada penelitian ini akan dibahas mengenai dampak adanya kerusakan berupa *debonding* dengan variasi rasio kerusakan terhadap respon dinamis yang diberikan oleh konstruksi *ramp door sandwich panel system*. Serta membandingkan pengaruh pengaplikasian *spring element* terhadap pemodelan pada *finite element software*. Simulasi analisa dilakukan dengan *finite element software*, dengan material baja sebagai *face plate* dan material resin dengan campuran cangkang kerang sebesar 30% pada *core*. Kondisi batas dimodelkan pada *rampdoor* kapal penumpang dengan kondisi *clamp-free-clamp-free*. Kerusakan *debonding* yang terjadi pada struktur dimodelkan dengan variasi rasio sebesar 2,5%, 5%, dan 7,5%.

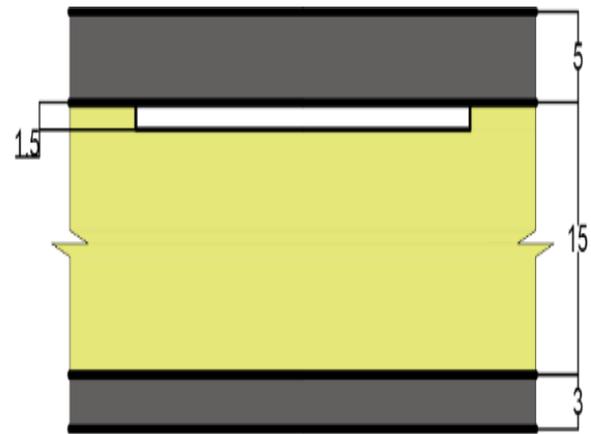
II. STUDI LITERATUR

A. Material Sandwich Plate System pada Konstruksi Kapal

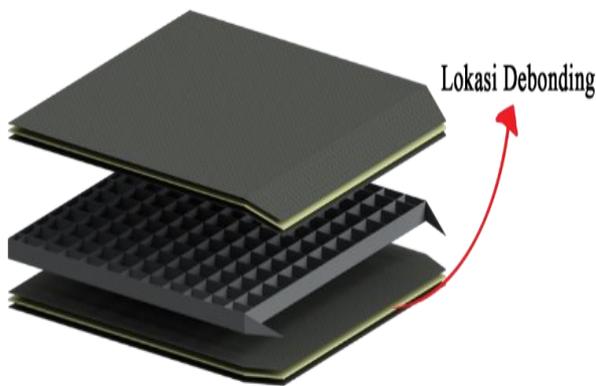
Sandwich Plate System (SPS) adalah material yang ringan dan strukturnya terdiri dari dua pelat berbahan metal yang dipisahkan dengan material inti berupa elastomer. Material



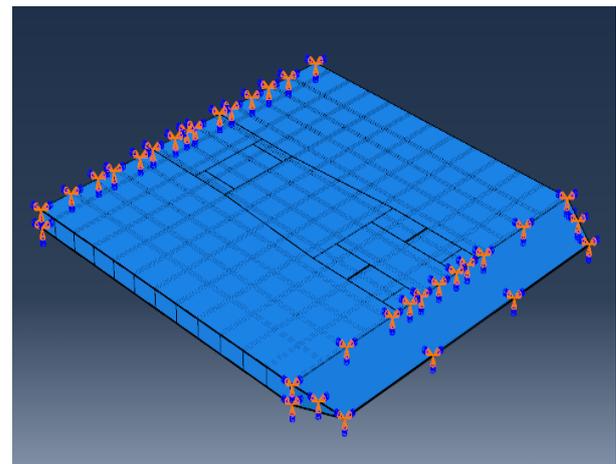
Gambar 1. Pemodelan *debonding* dengan 3D SPRING2 element.



Gambar 3. Tebal kerusakan *debonding*.



Gambar 2. Lokasi terjadinya kerusakan *debonding*.



Gambar 4. *Boundary Condition* yang diterapkan pada model.

pada pelat biasanya terbuat dari baja dan digabung oleh perimeter bar pada tiap tepi sisi baja tersebut [8]. *Sandwich Plate System (SPS)* dibentuk dengan menyuntikkan cairan elastomer ke dalam rongga antara dua pelat baja tersebut. Material inti biasanya terbuat dari *elastomer polyurethane* yang telah padat. Dengan adanya *elastomer* tersebut, memberikan kekuatan pada struktur melalui ikatan pada pelat. Sehingga dapat menghilangkan kebutuhan terhadap penegar [9].

Pada peraturan konstruksi *steel sandwich panel* didefinisikan terdiri dari tiga lapisan yaitu dua lapisan pelat baja (*face plate*) dan satu lapisan inti (*core*) [10]. *Core* diinjeksi pada rongga diantara dua lapisan baja dan menyatu secara langsung pada kedua permukaan lapisan baja tersebut.

Karakteristik *sandwich plate system* pada pembangunan kapal strukturnya sederhana dan mudah dibangun, dapat meminimalisir kebutuhan akan perawatan, dapat menambah ketahanan terhadap korosi, ketahanan terhadap retak, dan masalah struktural lainnya [11].

Penerapan pelat *sandwich* pada bagian *side shell* lambung kapal menghasilkan tegangan dan lendutan yang lebih rendah dibandingkan dengan pelat konvensional. Berkurangnya penegar pada struktur *side shell sandwich plate* menyebabkan peningkatan tegangan dan defleksi. Pengurangan *web frame* dapat mengakibatkan efek yang lebih signifikan daripada pengurangan *side longitudinal*. Sehingga pada konfigurasi yang paling optimal didapat dari pengurangan seluruh *side*

longitudinal dalam *side shell* tanpa mengubah jarak *web frame* yang berkontribusi pada pengurangan berat hingga 17% dari konstruksi pelat konvensional dengan nilai tegangan dan lendutan yang masih berada dibawah kriteria yang diijinkan [2].

B. Material Inti Sandwich

Penelitian terhadap penggunaan bubuk cangkang kerang (*clamshell powder*) sebagai pengisi bahan inti material *sandwich* telah dilakukan [12]. Cangkang kerang (*Anadara Granosa*) dipilih karena merupakan material yang tidak digunakan lagi (limbah) dan bersifat dapat diperbarui. Dalam penelitian tersebut bertujuan untuk menemukan komposisi terbaik untuk material inti *sandwich*. Material inti *sandwich* yang diuji terdiri dari variasi komposisi bubuk cangkang kerang yang berbeda yaitu sebesar 0%, 10%, 20%, 30%, 35%, dan 40%. Bubuk kerang tersebut dicampurkan dengan resin sebagai bahan material inti *sandwich*. Dari hasil penelitian tersebut didapatkan hasil yang paling optimal dan dengan karakteristik material yang terbaik yaitu pada komposisi campuran *filler* bubuk cangkang kerang sebesar 30% dari berat total material inti *sandwich* [12]. Oleh karena itu pada penelitian ini, menggunakan *filler* campuran resin dengan cangkang kerang sebesar 30% untuk bahan material inti *sandwich*.

C. Kerusakan *Debonding* pada *Sandwich Panel*

Salah satu kerusakan yang sangat mungkin terjadi pada material *sandwich panel* adalah kerusakan berupa *debonding*. *Debonding* merupakan kerusakan yang bersifat lokal yang

Tabel 1.
Konfigurasi Masing-Masing Konstruksi Model Sandwich

Model	Ketebalan Pelat (mm)	Penegar Memanjang	Penegar Melintang
Existing	10	12	16
Sandwich Model A	5-15-5	12	16
Sandwich Model B	5-15-3	12	16
Sandwich Model C	5-15-3	12	12
Sandwich Model D	5-15-3	9	9
Sandwich Model E	5-15-3	6	6

Tabel 2.
Data Hasil Simulasi Statis Masing-Masing Konstruksi Ramp Door

Model	σ Mpa	U mm
Existing	47.66	0.0011
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

Tabel 3.
Material properties yang digunakan

Material	Berat Jenis (kg/m ³)	Modulus Young (Mpa)	Rasio Poisson's
Baja	7850	2.06 x 10 ⁵	0.30
Core	1465	3.31 x 10 ⁵	0.30

Tabel 4.
Dimensi kerusakan debonding

Model	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Luas (mm ²)
Luas Seluruhnya	8	8.6	68.8
Luas Debonding 2.5%	1.3115	1.3115	1.72
Luas Debonding 5%	1.8547	1.8547	3.44
Luas Debonding 7.5%	2.2716	2.2716	5.16

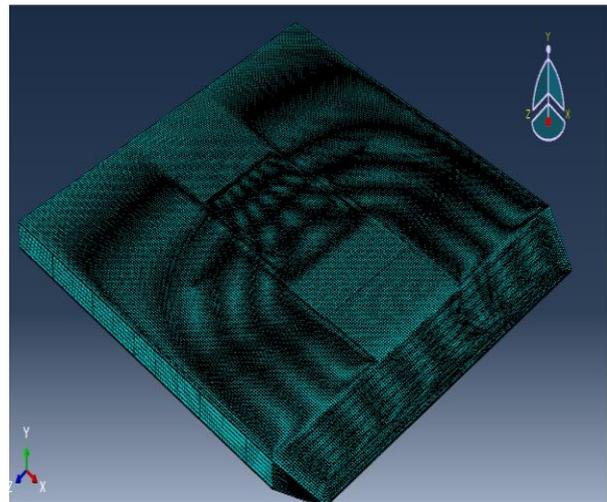
terjadi karena terlepasnya ikatan antara material pelat dengan material inti sandwich. Perbedaan yang besar antara ketebalan dan modulus elastisitas pada lapisan material metal dan lapisan material inti sandwich membuat material sandwich panel rentan terhadap kerusakan debonding [5].

Kerusakan debonding seringkali tidak terdeteksi secara langsung karena lokasi kerusakan debonding biasanya tertutup oleh lapisan pelat dari suatu konstruksi sandwich panel. Namun dengan adanya kerusakan debonding dapat mengakibatkan berkurangnya kekuatan struktur sandwich dan dapat menyebabkan kerusakan prematur dibawah beban desain yang direncanakan [13]. Selain itu kerusakan debonding dapat mengubah respon dinamis pada sebuah struktur serta mengurangi kekakuan dan kekuatan secara keseluruhan [14].

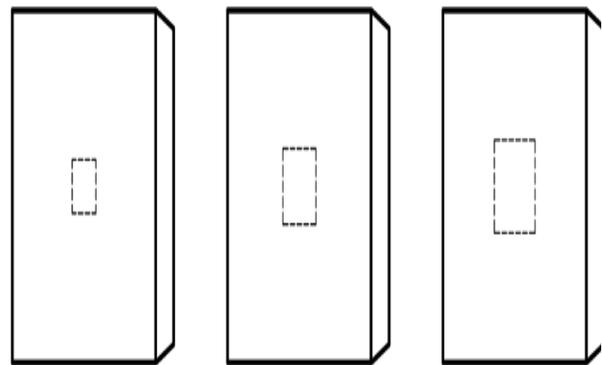
D. Frekuensi Alami

Frekuensi alami (natural frequency) adalah frekuensi osilasi yang dimiliki oleh struktur atau sebuah sistem pada saat struktur atau sistem tersebut dibiarkan bergerak tanpa adanya redaman (damping) maupun eksitasi. Hal ini juga sering disebut dengan frekuensi getaran bebas. Setiap struktur mempunyai frekuensi naturalnya masing masing. Frekuensi alami sebuah struktur dipengaruhi oleh kekakuan dan massa struktur tersebut. Secara matematis, frekuensi alami didefinisikan pada persamaan (1).

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ (rad/s)}, \text{ atau } f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ (hertz)} \quad (1)$$



Gambar 5. Detail mesh pada model sandwich.

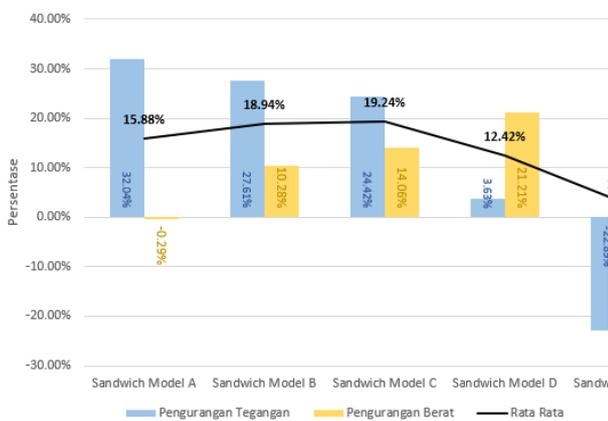


Gambar 6. Variasi rasio kerusakan debonding (a) 2,5% (b) 5% (c) 7,5%.

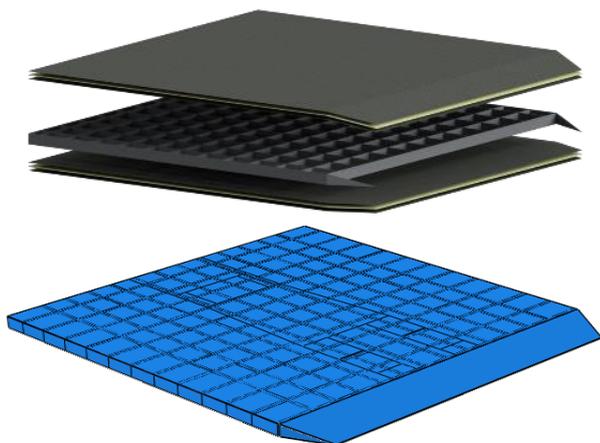
Sebuah struktur pasti mengalami adanya getaran jika diberikan gaya luar terhadap struktur tersebut. Jika osilasi yang ditimbulkan oleh gaya luar ternyata sama ataupun mendekati dengan frekuensi natural struktur tersebut, maka terjadi resonansi. Hal ini berdampak buruk pada kekuatan struktur karena akan menyebabkan osilasi besar yang berbahaya. Oleh karena itu pada saat proses desain suatu struktur perlu diketahui besarnya natural frekuensi dari struktur tersebut sebagai pedoman apakah suatu struktur akan mengalami resonansi atau tidak [15].

E. Pengaplikasian Spring Element pada Pemodelan di Zona Kerusakan Debonding

Untuk menghubungkan elemen-elemen pada face plate dengan core pada daerah ikatan kedua lapisan tersebut dilakukan dengan menggunakan Multi Point Constrains (MPC) yang menghubungkan keseluruhan node. Node ini dilambangkan sebagai node tunggal. Namun pada elemen-elemen yang terletak pada zona debonding, terdapat celah antara zona debonding yang berada pada core dengan zona pada face plate yang tegak lurus dengan zona debonding tersebut. Kurangnya adhesi antara elemen-elemen pada zona tersebut dimodelkan dengan menghapus constraint pada zona tersebut sehingga muncul node ganda pada zona tersebut. Untuk mencegah elemen-elemen yang tumpang tindih antara elemen pada face plate dan core, maka elemen pegas 3D SPRING2 diperkenalkan untuk diaplikasikan pada node ganda yang terletak pada daerah debonding [7].



Gambar 7. Akumulasi persentase pengurangan berat dan tegangan masing-masing model sandwich.



Gambar 8. Visualisasi sandwich model C.

Pengaplikasian 3D SPRING2 pada model dapat dilihat seperti pada Gambar 1.

III. METODOLOGI

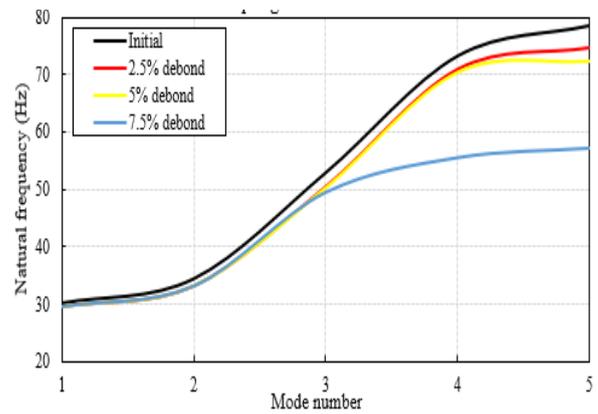
A. Referensi Model

Model konstruksi ramp door yang digunakan pada tugas akhir ini adalah Kapal Penumpang 6311 GT. Dari data referensi tersebut kemudian diaplikasikan ke konstruksi sandwich dengan ketebalan tertentu sesuai dengan class rules. Lalu dibuat beberapa variasi jumlah penegar yang berbeda untuk menemukan desain konstruksi sandwich panel yang paling optimal ditinjau dari persentase pengurangan berat dan pengurangan tegangan dibandingkan dengan konstruksi konvensional yang menggunakan material baja. Detail konfigurasi masing-masing model sandwich dapat dilihat pada Tabel 1 sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan [16].

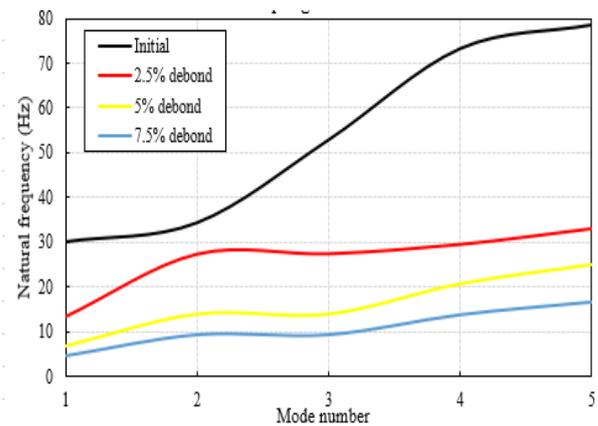
Setelah ditemukan konfigurasi ketebalan serta variasi jumlah penegar yang direncanakan dengan tegangan izin yang memenuhi peraturan, maka dilakukan pemodelan konstruksi baja dan konstruksi sandwich panel yang nantinya akan dilakukan analisa statis pada masing masing konstruksi tersebut. Data hasil simulasi statis diambil dari penelitian yang telah dilakukan [16] dapat dilihat pada Tabel 2.

B. Pemodelan pada Finite Element Software

Setelah ditemukan model konstruksi sandwich yang paling optimal ditinjau dari akumulasi persentase penurunan berat dan tegangannya, maka model konstruksi tersebut



Gambar 9. Perbandingan nilai natural frekuensi variasi rasio kerusakan debonding pemodelan dengan pengaplikasian spring element.



Gambar 10. Perbandingan nilai natural frekuensi variasi rasio kerusakan debonding pemodelan tanpa pengaplikasian spring element.

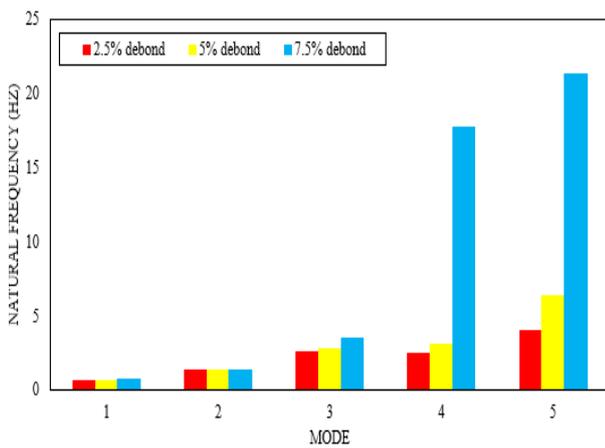
dimodelkan pada finite element software. Kerusakan berupa debonding dimodelkan sebagai cacat yang dibuat dengan asumsi terjadinya kerusakan saat proses manufaktur. Lokasi adanya cacat berupa debonding terletak pada core panel sandwich bagian bawah seperti tampak pada Gambar 2.

Kerusakan debonding pada penelitian ini dimodelkan dengan tebal 10% dari tebal core material sandwich panel. Ilustrasi tebal kerusakan debonding tampak seperti pada Gambar 3. Sehingga, jika ketebalan core material sebesar 15 mm, maka ketebalan dari kerusakan debonding sebesar 1.5 mm.

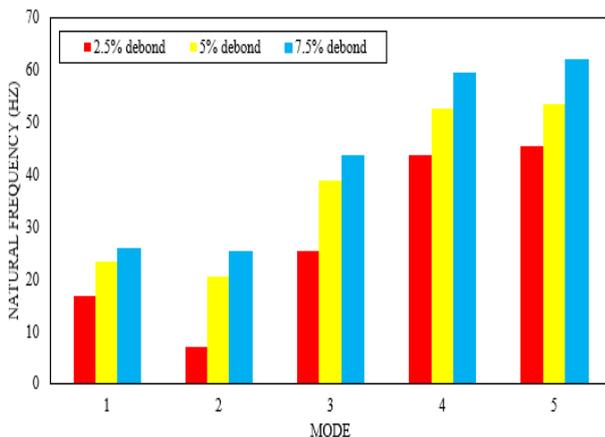
Lapisan face plate bagian atas maupun bagian bawah didefinisikan sebagai shell shape dengan tipe planar, sedangkan untuk lapisan core dan penegar didefinisikan sebagai solid shape dengan tipe extrusion. Penggunaan shell shape bertujuan untuk menyederhanakan model sehingga dapat menghemat waktu dalam proses running model.

Pada pemodelan ini, digunakan dua jenis material yaitu material baja untuk face plate dan stiffener konstruksi ramp door. Core sandwich menggunakan material campuran resin dengan cangkang kerang dengan presentase campuran sebesar 30% dari total berat core sandwich. Detail material properties untuk masing masing jenis material dapat dilihat pada Tabel 3.

Pada proses pemodelan interaksi, ada tiga jenis interaksi yang dilakukan yaitu node to node tie constraint, node-surface tie constraint, dan surface to surface tie constraint. Interaksi pada permukaan face plate dan core menggunakan surface to surface tie constraint. Sedangkan untuk



Gambar 11. Penurunan nilai natural frekuensi untuk variasi rasio kerusakan *debonding* pemodelan dengan pengaplikasian *spring element*.



Gambar 12. Penurunan nilai natural frekuensi untuk variasi rasio kerusakan *debonding* pemodelan tanpa pengaplikasian *spring element*.

permukaan *face plate* dengan penegar menggunakan *node-surface tie constraint*. *Node to node tie constraint* digunakan pada tiap garis yang bersinggungan antar *part* seperti sisi pelat dengan sisi pelat yang lain.

Kondisi batas yang diberikan pada model konstruksi *ramp door* yaitu dengan mengasumsikan *ramp door* tersebut pada saat kapal bersandar dengan *ramp door* terbuka yang siap untuk proses *loading* kendaraan. Dengan kondisi tersebut maka *boundary condition* yang diaplikasikan pada model konstruksi *sandwich* adalah tumpuan jepit pada sisi depan dan belakang *ramp door*. Sedangkan kedua sisi samping *ramp door* dibiarkan bergerak bebas tanpa tumpuan. Ilustrasi *boundary condition* pada konstruksi *ramp door* dapat dilihat pada Gambar 4.

Element shape mesh yang digunakan pada model adalah *quad-structured* karena sebagian besar bentuk *part ramp door* berbentuk balok. *Meshing* dilakukan secara individu pada tiap-tiap *part*. Hal ini dilakukan agar bentuk *meshing* lebih rapi sehingga mempunyai tingkat akurasi yang tinggi untuk hasil *running*. Gambar 5 menunjukkan detail *meshing* pada model *sandwich*.

C. Pemodelan Variasi Rasio Kerusakan *Debonding*

Rasio yang dimaksud dalam pemodelan *debonding* variasi rasio kerusakan ini adalah persentase luasan kerusakan *debonding* dibandingkan dengan luasan total dari *core material*. Kerusakan *debonding* berbentuk persegi dengan kedalaman 1,5 mm. Terdapat tiga item rasio kerusakan yang

akan dianalisa pada penelitian ini. Detail ukuran rasio kerusakan dapat dilihat pada dan diilustrasikan pada Tabel 4. Variasi rasio kerusakan *debonding* (a) 2,5% (b) 5% (c) 7,5% dapat dilihat pada Gambar 6.

D. Metode Pemodelan *Debonding*

Pada penelitian ini dilakukan pemodelan kerusakan berupa *debonding* dengan pengaplikasian *spring element* dan tanpa pengaplikasian *spring element*. Hal ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh penggunaan *spring element* pada pemodelan kerusakan *debonding* terhadap hasil simulasi dinamis pada *finite element software*.

Penggunaan *spring element* diaplikasikan pada permukaan *face plate* dan *core* yang mengalami kerusakan berupa *debonding*. *Spring element* diaplikasikan pada zona *debonding* yang berada pada *core* dengan zona pada *face plate* yang tegak lurus dengan node pada zona *debonding* tersebut.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisa Statis untuk Penentuan Model Optimal

Analisa statis pada sub bab ini digunakan untuk menentukan model *sandwich* yang paling optimal [16]. Indikator penentuan model *sandwich* yang paling optimal adalah ditinjau dari presentase pengurangan berat dan presentase pengurangan nilai tegangan masing-masing konfigurasi model *sandwich ramp door* terhadap konstruksi *ramp door* konvensional yang berbahan baja.

Dapat dilihat dari Gambar 7, model *sandwich* A dan model *sandwich* B yang mempunyai konfigurasi jumlah penegar yang sama dengan model konvensional (*existing*), keduanya memiliki tegangan *vonmises* yang lebih rendah dibandingkan dengan model konvensional. Model *sandwich* A dapat mengurangi tegangan *vonmises* sebesar 32,04% sedangkan Model *sandwich* B dapat mengurangi tegangan *vonmises* sebesar 27,61%. Pada model *sandwich* A dengan konfigurasi tebal pelat 5mm-15mm-5mm menunjukkan hasil tegangan yang lebih rendah daripada model *sandwich* B dengan konfigurasi tebal pelat 5mm-15mm-3mm. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa penggunaan material *sandwich* dapat mengurangi tegangan *vonmises* untuk konfigurasi jumlah penegar yang sama, serta konfigurasi ketebalan pelat *sandwich* dapat mempengaruhi besarnya pengurangan tegangan *vonmises*. Semakin tebal konfigurasi pelat *sandwich*, semakin besar juga pengurangan tegangan *vonmises* pada model konstruksi *sandwich* tersebut.

Model *sandwich* B, C, D, dan E mempunyai konfigurasi ketebalan pelat *sandwich* yang sama yaitu 5mm-15mm-3mm. Dapat dilihat bahwa presentase pengurangan tegangan *vonmises* secara berurutan pada konstruksi model *sandwich* B, C, D, dan E adalah sebesar 27,61%; 24,42%; 3,63%; dan -22,89%. Tanda negative pada nilai presentase pengurangan tegangan *vonmises* model *sandwich* E mempunyai arti bahwa pada model *sandwich* E tidak mengalami pengurangan tegangan *vonmises*, justru mengalami penambahan tegangan *vonmises*. Hal ini disebabkan jarak penegar yang terlalu jauh sehingga menyebabkan adanya beban terpusat yang besar. Dari data tersebut, dapat diketahui bahwa dengan konfigurasi ketebalan yang sama, semakin sedikit jumlah penegar, semakin jauh juga jarak antar penegar. Sehingga

pengurangan tegangan *vonmises* dari konstruksi model *sandwich* semakin kecil, bahkan bisa mengakibatkan penambahan tegangan *vonmises* jika dibandingkan dengan konstruksi model konvensional.

Dari grafik gambar 7, penerapan model *sandwich* dengan konfigurasi ketebalan 5mm-15mm-3mm menunjukkan pengurangan berat sekitar 10,28% sampai dengan 28,35%. Namun untuk model *sandwich* A dengan konfigurasi ketebalan 5mm-15mm-5mm justru mempunyai berat yang lebih tinggi dari pada konstruksi konvensional dengan jumlah penegar yang sama. Hal ini terjadi karena konfigurasi ketebalan pelat berbahan baja pada model *sandwich* A tidak berkurang ketebalannya dari konstruksi konvensional. Sehingga dapat disimpulkan bahwa penerapan konstruksi *sandwich panel* sangat tidak efisien jika total tebal keseluruhan *faceplate* yang berbahan baja pada konstruksi *sandwich panel* sama dengan tebal pelat konstruksi konvensional. Sedangkan untuk konfigurasi ketebalan material *sandwich panel* yang didesain dengan pengurangan ketebalan *face plate* yang berbahan baja berkontribusi cukup besar dalam pengurangan berat dibandingkan dengan konstruksi *ramp door* konvensional.

Bedasarkan Gambar 7, diketahui bahwa pengurangan tegangan *vonmises* yang paling besar terjadi pada *sandwich* model A dengan persentase 32,04%, sedangkan untuk pengurangan berat yang paling tinggi yaitu pada konstruksi *sandwich* model E dengan 28,35%. Namun pada kedua model ekstrim tersebut tidak menunjukkan adanya konstruksi *sandwich* yang optimal. *Sandwich* model A memiliki pengurangan tegangan *vonmises* yang paling besar, namun justru mengalami penambahan berat pada konstruksi *sandwich* tersebut. Begitupun sebaliknya, pada *sandwich* model E memiliki pengurangan berat konstruksi yang paling besar namun justru mengalami penambahan tegangan *vonmises*.

Sandwich model C menunjukkan nilai akumulasi persentase pengurangan berat dan persentase pengurangan tegangan *vonmises* yang paling tinggi pada angka 19,24%. Hal ini menunjukkan bahwa untuk menemukan desain konstruksi *sandwich ramp door* yang paling optimal tidak hanya dengan mengurangi berat konstruksi dengan mengurangi jumlah penegar atau mengurangi tebal konfigurasi *face plate* saja, namun juga dipertimbangkan kekuatan dari struktur konstruksi tersebut. Sehingga pada penelitian ini *sandwich* model C dipilih sebagai basis konstruksi *ramp door sandwich panel system* untuk menganalisa respon dinamis pada konstruksi yang mengalami kerusakan *debonding*. Visualisasi *sandwich* model C dimodelkan terlihat pada Gambar 8.

B. Analisa Konvergensi

Analisa konvergensi dilakukan dengan melakukan simulasi statis pada *sandwich* model C [16]. Pemodelan *meshing* dilakukan secara keseluruhan konstruksi *sandwich* model dengan ukuran yang sama untuk semua *part*. Ukuran *meshing* yang diuji adalah pada range 0,1 m sampai dengan 0,03 m. Parameter yang digunakan sebagai acuan adalah nilai dari tegangan *vonmises* dan nilai deformasi pada konstruksi model *sandwich*. Ukuran *mesh* sebesar 0,05 m sudah menunjukkan nilai yang konvergen baik untuk tegangan *vonmises* maupun untuk besarnya deformasi yang terjadi

pada konstruksi *sandwich* model. Namun pemodelan *meshing* pada model *sandwich* dilakukan modifikasi pada tiap *part* yang membutuhkan penambahan jumlah *meshing* dengan memperkecil ukuran *mesing* pada *part* tersebut. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan hasil kontur yang lebih akurat pada bagian-bagian tersebut. *Part* yang dimaksud antara lain adalah *face plate* atas yang ukuran *meshing*-nya dimodifikasi menjadi 0,04 m, *part* penegar dengan *meshing* berukuran 0,03 m, dan *part* segitiga dengan *meshing* berukuran 0,02 m. Sehingga untuk model *sandwich* ini mempunyai total keseluruhan 241.309 buah elemen dan 315.324 *nodes*.

C. Pengaruh Rasio Kerusakan *Debonding* terhadap Respon Dinamis

Rasio kerusakan yang dimaksud adalah persentase luasan cacat berupa *debonding* terhadap luas keseluruhan pada permukaan *sandwich* tersebut. Pada analisa ini dilakukan perbandingan nilai frekuensi natural dari model *sandwich* yang sehat (tidak terjadi kerusakan berupa *debonding*) dengan model *sandwich* yang mengalami kerusakan *debonding* dengan rasio kerusakan sebesar 2,5%; 5%; dan 7,5%. Ilustrasi pemodelan kerusakan *debonding* dengan variasi rasio dapat dilihat pada Gambar 6. Juga dilakukan analisa terhadap pemodelan dengan pengaplikasian *spring element* dan pemodelan tanpa pengaplikasian *spring element*. Hasil dari analisa ditampilkan pada Gambar 9 dan Gambar 10.

Penurunan nilai natural frekuensi dari model *sandwich* terhadap model konvensional ditunjukkan pada Gambar 11 dan Gambar 12.

Pada Gambar 12, dapat diketahui bahwa berkat adanya kerusakan berupa *debonding* menyebabkan penurunan nilai natural frekuensi, baik pada model yang menggunakan *spring element* maupun model tanpa pengaplikasian *spring element*. Perbedaan yang sangat mencolok terlihat pada penurunan nilai frekuensi pada model dengan pengaplikasian *spring element* dan model tanpa pengaplikasian *spring element*. Nilai natural frekuensi yang terjadi pada pemodelan tanpa menggunakan *spring element* mengalami penurunan yang sangat jauh dari natural frekuensi model *ramp door sandwich* yang sehat. Hal ini disebabkan karena pada pemodelan kerusakan *debonding* tanpa pengaplikasian *spring element* mengabaikan interaksi kontak antar lapisan *face plate* dengan *core* pada zona *debonding*. Sehingga terjadi ketidaksesuaian hasil simulasi dengan kondisi nyata.

Selanjutnya analisa dilakukan pada pemodelan dengan pengaplikasian *spring element* dikarenakan hasil pemodelan tanpa pengaplikasian *spring element* dianggap kurang akurat. Gambar 9 menunjukkan bahwa adanya kerusakan *debonding* mengakibatkan penurunan natural frekuensi pada seluruh mode. Pada mode pertama, penurunan nilai natural frekuensi relatif kecil untuk ketiga variasi model dengan rasio kerusakan. Seiring bertambah besarnya mode, penurunan nilai natural frekuensi semakin besar. Terjadi penurunan nilai natural frekuensi yang besar pada mode tinggi. Hal ini dapat diartikan bahwa penurunan natural frekuensi pada mode tinggi lebih sensitif. Penurunan nilai natural frekuensi untuk variasi rasio mencapai angka tertinggi pada mode ke-5 dengan kerusakan *debonding* 7,5%. Penurunan frekuensi secara signifikan terjadi pada rasio kerusakan *debonding*

7,5% terhadap model *sandwich* yang sehat dengan range 0,693 Hz sampai 21,299 Hz. Untuk rasio kerusakan *debonding* sebesar 2,5% dan 5% juga terjadi penurunan nilai natural frekuensi, namun tidak terlalu ekstrim. Dari data tersebut dapat dilihat bahwa semakin besar rasio kerusakan, semakin besar pula penurunan nilai natural frekuensi.

Penurunan natural frekuensi menyebabkan kekakuan suatu struktur juga turun. Sehingga semakin besar rasio kerusakan *debonding* pada konstruksi *ramp door sandwich*, mengakibatkan kekakuan konstruksi yang semakin rendah.

V. KESIMPULAN

Bedasarkan pengujian yang telah dilakukan, kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut: (1)Kerusakan berupa *debonding* mengakibatkan penurunan nilai natural frekuensi pada suatu konstruksi. Nilai natural frekuensi pada konstruksi yang mengalami kerusakan *debonding* semakin rendah seiring bertambahnya besar rasio kerusakan *debonding*. Semakin besar rasio kerusakan *debonding*, semakin besar juga penurunan nilai natural frekuensi pada konstruksi *rampdoor sandwich* yang menyebabkan menurunnya kekakuan konstruksi tersebut. Mode 5 merupakan mode yang paling sensitif terhadap penurunan nilai natural frekuensi. Pada mode 5 nilai natural frekuensi konstruksi *ramp door sandwich* dengan rasio kerusakan *debonding* sebesar 2,5% adalah 74,529 Hz dengan penurunan sebesar 3,979 Hz terhadap konstruksi *sandwich* yang sehat. Rasio kerusakan *debonding* sebesar 5% memiliki nilai natural frekuensi 72,188 Hz dengan penurunan sebesar 6,383 Hz terhadap konstruksi *sandwich* yang sehat. Rasio kerusakan *debonding* sebesar 7,5% memiliki nilai natural frekuensi 57,272 Hz dengan penurunan sebesar 21,299 Hz terhadap konstruksi *sandwich* yang sehat; (2)Pemodelan konstruksi *sandwich* tanpa pengaplikasian *spring element* menunjukkan hasil pengurangan nilai natural frekuensi yang sangat besar pada kerusakan *debonding*. Sehingga hasil tersebut tidak dapat dijadikan acuan karena pada tahap pemodelan tanpa *spring element*, interaksi antar lapisan *face plate* dan *core* terabaikan. Oleh karena itu direkomendasikan untuk menggunakan pengaplikasian *spring element* pada proses pemodelan interaksi antar *node* pada zona yang mengalami kerusakan *debonding*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Baidowi, E. Utomo, D. K. Fiqih, and H. Indria, "Penggunaan sandwich plate system (SPS) pada konstruksi inner bottom," *KAPAL J. Ilmu Pengetah. Teknol. Kelaut.*, vol. 12, no. 2, pp. 60–68, 2015, doi: 10.14710/KPL.V12I2.8348.
- [2] 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 00 (2019) 0000–0000*, 2019, vol. 13, pp. 109–114, doi: 10.1016/j.matpr.2019.03.197.
- [3] Tuswan, A. Zubaydi, A. Budipriyanto, and S. H. Sujatanti, "Comparative study on ferry Ro-ro's car deck structural strength by means of application of sandwich materials," no. July 2020, pp. 87–96, 2020, doi: 10.5220/0008542800870096.
- [4] 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.
- [5] V. N. Burlayenko and T. Sadowski, "Linear and nonlinear dynamic analyses of sandwich panels with face sheet-to-core debonding," *Shock Vib.*, vol. 2018, no. 1–27, 2018, doi: 10.1155/2018/5715863.
- [6] V. N. Burlayenko and T. Sadowski, "Numerical modeling of dynamics of sandwich plates with partially debonded skin-to-core interface for damage detection," in *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN 2011*, 2011, no. July, pp. 2242–2249.
- [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] 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.
- [9] K. Ramakrishnan and P. S. Kumar, "Applications of sandwich plate system for ship structures," *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, pp. 83–90, 2016.
- [10] L. Register, "Provisional rules for the application of sandwich panel construction to ship structure," United Kingdom, 2015.
- [11] M. A. Brooking and S. J. Kennedy, "The performance, safety and production benefits of SPS structures for double hull tankers," in *Proceedings of the RINA Conference on Double Hull Tankers*, 2004, pp. 1–2.
- [12] 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.
- [13] L. A. Carlsson and G. A. Kardomateas, *Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites*. London New York: Spinger Dordrecht Heidelberg, 2011.
- [14] H. Y. Kim and W. Hwang, "Effect of debonding on natural frequencies and frequency response functions of honeycomb sandwich beams," *Compos. Struct.*, vol. 55, no. 1, pp. 51–62, Jan. 2002, doi: 10.1016/S0263-8223(01)00136-2.
- [15] S. Maulidiya and R. Rusli, "Penentuan frekuensi natural dan arah pergerakan gelombang (studi kasus: jembatan soekarno hatta kota malang)," *J. MIPA*, vol. 6, no. 1, p. 1, 2017, doi: 10.35799/jm.6.1.2017.15222.
- [16] Tuswan *et al.*, "Influence of application of sandwich panel on static and dynamic behavior of ferry ro-ro ramp door," 2020.