

Identifikasi Kerusakan Berbasis Getaran Plat *Sandwich* pada Konstruksi Lambung Kapal

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

Abstrak—Teknologi pada konstruksi bangunan kapal semakin berkembang. Salah satunya penggunaan plat sandwich pada bangunan kapal. Plat sandwich merupakan pengembangan material untuk menggantikan plat baja konvensional yang dapat digunakan untuk struktur bangunan kapal. Kelebihan dari plat sandwich sendiri meningkatkan kekakuan daripada plat baja konvensional, serta mengurangi berat dari struktur bangunan kapal agar dapat menambah kapasitas muatan. Pada penelitian ini dilakukan identifikasi kerusakan berbasis getaran di bagian lambung kapal. Identifikasi ini dilakukan dengan metode elemen hingga (MEH). Peninjauan dilakukan berfokus pada besar ukuran kerusakan, lokasi kerusakan dan kondisi batas pada core material yang mempengaruhi frekuensi alami pada strukturnya. Plat sandwich yang digunakan pada penelitian ini memiliki face plate baja dengan core material dari bahan Polyurethane (PU) elastomer yang telah diuji pada penelitian sebelumnya untuk memenuhi standar klasifikasi yang berlaku. Berdasarkan hasil analisis pada penelitian ini, diketahui nilai frekuensi natural menurun setiap pertambahan besar volume kerusakan buatan. Pengaruh dari perbedaan lokasi kerusakan pada setiap jarak yang menjauhi tumpuan jepit (clamped) nilai frekuensi natural semakin menurun. Identifikasi kerusakan dapat diprediksi dengan parameter frekuensi natural dimana kita dapat mengetahui seberapa besar kerusakan dan dimana lokasi kerusakan yang terjadi pada plat sandwich.

Kata Kunci—Plat *sandwich*, Identifikasi Kerusakan, Metode Elemen Hingga (MEH), Frekuensi Natural.

I. PENDAHULUAN

PERKEMBANGAN teknologi yang sangat pesat menuntut desainer dan engineer untuk terus berinovasi dalam menghasilkan sesuatu yang baru dan mempunyai nilai tambah bagi kehidupan manusia. Tidak terkecuali sistem konstruksi pada kapal. Sekarang, banyak sekali terobosan-terobosan baru dalam teknologi material. Tentu saja tujuan utama adalah material yang lebih ringan, kuat, dan tahan lama. Material pada kapal, pada umumnya adalah baja. Tetapi baja dirasa masih kurang efektif dalam segi berat dalam proses desain kapal. Penelitian terkini banyak yang mengarah kepada pengembangan material baru dalam aplikasi pada kapal. Salah satunya adalah Sandwich panel. Sandwich panel adalah material yang bentuknya berlapis, dengan material inti pada umumnya terbuat dari material ringan dan material faceplate berasal dari material yang kaku. Telah banyak penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, mengenai pengaruh Sandwich panel pada kontribusi LWT kapal. Diantaranya dilakukan oleh N. Momcilovic et.al (2009) dan M. Brooking et.al (2004) [1][2]. Rata-rata pada kedua penelitian itu reduksi berat pada Sandwich panel dapat mencapai 10% dari berat kapal itu sendiri. Saat material sandwich panel terpasang pada kapal, material tidak akan lepas dari gaya eksternal. Gaya inilah yang akan memicu

timbulnya cacat. Cacat kelamalaman akan menjalar dan dapat mengakibatkan kegagalan dalam sistem konstruksi. Pada penelitian J.Jweeg, Muhsin, et.al (2012) meneliti tentang perubahan natural frekuensi yang terjadi pada suatu material jika pada material tersebut terdapat kerusakan [3]. Hanya pada penelitian tersebut, material yang digunakan menggunakan komposit fiber, dan variabel retak yang diteliti berdasarkan sudut kemuculan dari retak tersebut. Pada penelitian ini hasil yang didapatkan adalah terjadi tren kenaikan frekuensi natural seiring bertambahnya sudut dari crack tersebut. Oleh karena itu, akan dilakukan sebuah penelitian untuk mengidentifikasi suatu material Sandwich panel sebagai salah satu jenis material baru dalam dunia perkapalan yang akan mem

bahas tentang pengaruh variasi cacat buatan pada material tersebut. Dan perlu analisis kerusakan untuk memastikan kekuatan daripada struktur plat sandwich tersebut. Pada penelitian ini akan membahas identifikasi kerusakan plat sandwich menggunakan metode elemen hingga dengan variasi ukuran besar kerusakan dan lokasi kerusakan pada frekuensi natural di mode 1 hingga mode 6 disertai kondisi spring element pada tiap kerusakan.

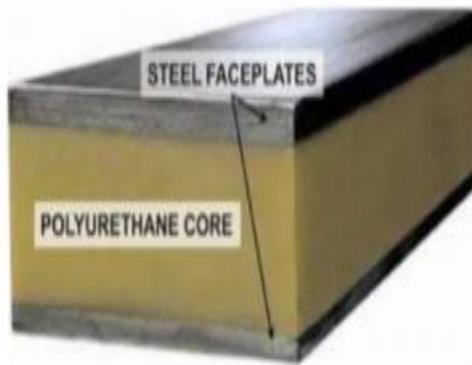
II. STUDI LITERATUR

A. Material Sandwich Plate pada Konstruksi Kapal

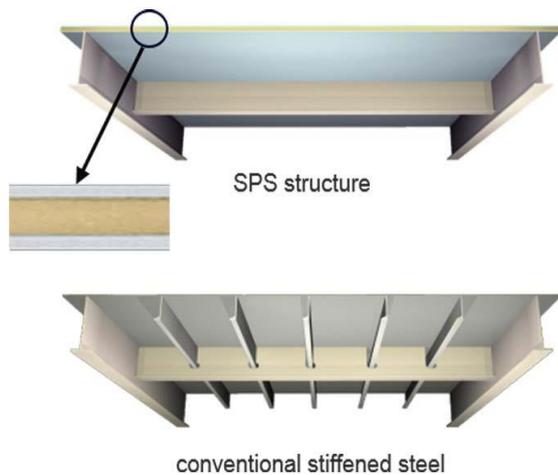
Sandwich Plate System (SPS) merupakan material ringan yang merupakan struktur dua pelat logam yang dipisahkan oleh material inti elastomer. Plat, biasanya terbuat dari baja, digabungkan sebagai batas luar dari material di kedua sisi dan kemudian disatukan oleh material inti yaitu *polyurethane* [1].

Penggunaan SPS ini berkembang baik selama 10 tahun ini, awal mula material ini dikembangkan bertujuan untuk memberikan tambahan ketahanan benturan (impact) pada pelat untuk struktur bangunan offshore di daerah es *Beaufort Canada*. *Intelligent Engineering, Ltd* (IE) yang memiliki hak paten pada material SPS ini bersama mitra industri *Elastogran GmbH*, anggota dari *BASF Group*.

Dari hubungan antara tegangan dan regangan material Polyurethane elastomer dari berbagai kondisi suhu, berdasarkan hasil yang dilakukan Brooking & Kennedy didapatkan karakteristik mekanikal properties yaitu; (1)ketahanan fatigue (S-N curves) pada ikatan antar 2 pelat dan sambungan las saat penggabungan panel SPS; (2)etahanan pada air laut serta ketahanan kimia plat elastomer harus dapat bertahan selama proses pengoperasian material; (3)ketahanan terhadap getaran serta peredaman terhadap kebisingan. SPS memberikan ketahanan yang jauh lebih baik daripada baja; (4)ketahanan terhadap balistik yang diuji pada dimensi peluru 7,62 mm, hasil dari pengujian yang dilakukan bahwa kurva balistik untuk SPS berada dibawah dari baja,



Gambar 1. Komposisi Material Sandwich.



Gambar 2. Plat sandwich pada Konstruksi Kapal.

yang menandakan bahwa SPS lebih tahan terhadap ketahanan balistik dibanding dengan material baja.

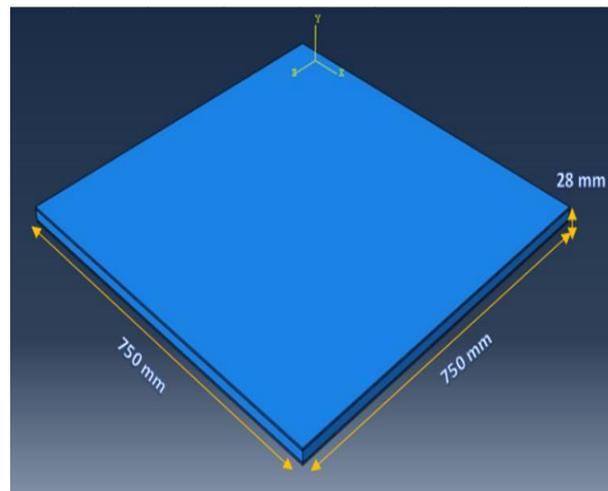
Penerapan pelat sandwich pada bagian *side shell* lambung Selain itu, apabila dibandingkan dengan plat baja berpenegar, penerapan material plat sandwich mampu mengurangi volume las hingga 60% [4]. Material sandwich dapat dibedakan berdasarkan komposisi material penyusunnya. Konfigurasi tersebut antara lain :

1) Struktur Sandwich Logam

Struktur ini merupakan struktu pada bagian kulit (*facing sheet*) dan inti (*core*) nya secara keseluruhan terbuat dari logam. Pada umumnya logam yang digunakan adalah baja dan aluminium. Selain dari bahan penyusunnya, struktur sandwich logam juga dapat diklasifikasikan menurut bentuk geometri intinya. Contoh bentuk core struktur sandwich logam adalah I, Z, V, O, honeycomb dan corrugated. Sedangkan penggabungan *facingsheet* dan *core*-nya dilakukan teknik pengelasan atau dengan pengelasan laser atau pengelasan busur.

2) Struktur Hybrid Metal Sandwich

Hybrid Metal Sandwich ini terdiri dari material logam dan non-logam. Contoh yaitu pada struktur baja dengan inti berbentuk I. Untuk meningkatkan kekuatan lokal atau ketahanan terhadap api, inti material tersebut dapat diisi material seperti polimer, kayu balsa, rockwool dan busa.



Gambar 3. Dimensi Model pada software Elemen Hingga.

Tabel 1. Input Data Material

Material	Baja A36	Polyurethane
Densitas	7850 kg/m ³	1098 kg/m ³
Young Modulus	200 GPa	901,95 MPa
Poisson Ratio	0,3	0,36

Tabel 2. Variasi Model

No.	Variasi	Kerusakan Buatan
1.	Model 1	Pelat Utuh
2.	Model 2	Kerusakan 2% dari tebal <i>core</i> material

Tabel 3. Model Besar Kerusakan

Besar Kerusakan	20%	
-----------------	-----	--

Contoh lain yaitu gabungan antara pelat terdiri dari baja atau aluminium dengan inti diisi material elastomer polyurethane.

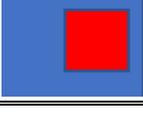
3) Struktur Sandwich dengan material komposit

Struktur ini merupakan struktur sandwich yang dikombinasi dengan dua atau lebih material intinya melalui pencampuran yang tidak homogen dengan sifat masing-masing mamaterial pembentuknya berbeda. Contoh daripada material komposit dari bahan organik yaitu kayu, tulang, dan gigi. Material komposit buatan adalah kertas, concrete, dan fiberglass. Pada umumnya komposit buatan yang sering digunakan yaitu fiberglass reinforced polymer (FRP).

B. Ekstensi Material Sandwich

Pada umumnya material sandwich digunakan pada konstruksi bangunan seperti dinding gedung, jembatan, struktur pesawat dan konstruksi kapal. Klasifikasi yang memiliki peraturan penggunaan plat sandwich pada konstruksi kapal yaitu Lloyd's Register (LR) dan DNV-GL agar memenuhi standard. Pengaplikasian material sandwich dapat mengurangi konfigurasi penegar pada struktur kapal [5]. Penerapan material sandwich mampu mengurangi penegar dan tegangan pada struktur masih memenuhi standard yang diijinkan telah diteliti oleh I.A. Mula (2017) [6]. Dengan komposisi yang dapat dilihat pada Gambar 1. Pengurangan penegar pada material sandwich dapat meningkatkan berat muatan dari kompensasi pengurangan

Tabel 4.
Variasi Lokasi Kerusakan

No	Variasi Lokasi Kerusakan	Visualisasi model
1.	0.25 L	
2.	0.375 L	
3.	0.5 L	
4.	0.625 L	
5.	0.75 L	

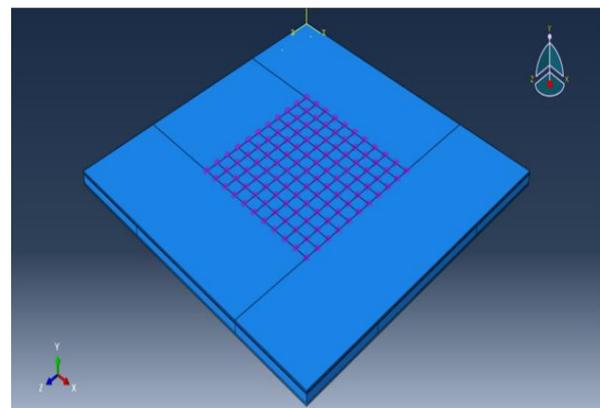
berat [2]. Penempatan pelat sandwich dapat mengurangi berat yang dapat dilihat pada Gambar 2.

Pengurangan berat *sandwich* pada konstruksi diatas mencapai 6% pada variasi pergantian penegar dengan panel sandwich berbahan *V-core*. Penerapan material sandwich polyurethane elastomer tipe *room temperature cured* yang digunakan pada material sandwich tidak mudah untuk didapatkan dan memiliki harga yang relatif mahal [5]. Material yang murah dan mudah didapat akan menjadi pertimbangan dalam pemilihan material *sandwich* [7]. Ekstensi material sandwich cocok digunakan pada industri perkapalan di Negara berkembang seperti Indonesia. Maka dari itu perlu dilakukan analisis material dengan berbagai variasi untuk memenuhi kriteria seperti harga yang murah, bahan material yang mudah didapatkan didalam negeri atau tidak perlu impor dan memenuhi standarisasi dari klasifikasi yang berlaku di Indonesia agar dapat diaplikasikan pada skala industri.

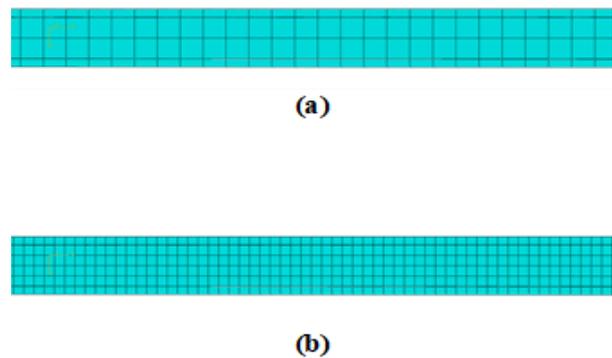
C. Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga adalah salah satu metode pendekatan numeric dimana persamaan diferensial parsial ini bisa diselesaikan dengan cara pendekatan terhadap kondisi sebenarnya. Dari sudut pandang teknik (engineering), FEM adalah metode agar dapat memecahkan masalah untuk menganalisa tegangan, perpindahan panas, aliran fluida, regangan dan lainnya termasuk frekuensi natural dengan menggunakan simulasi komputer.

Untuk permasalahan yang lebih kompleks seperti pembebanan, geometri dan sifat dari material, umumnya cukup sulit untuk menyelesaikan secara persamaan matematis. Penyelesaian matematis yaitu menggunakan persamaan matematika yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dari nilai yang tidak diketahui pada setiap lokasi dibagian atau objek tertentu secara local maupun global dari model elemen hingga yang digunakan. Masalah struktur yang dapat missal memperoleh nilai besar tegangan



Gambar 4. Hasil model *spring element*.



Gambar 5. Perbedaan ukuran *mesh* (a) Ukuran *mesh* 10 mm, (b) Ukuran *mesh* 4,5 mm.

(stress), regangan (strain), buckling, dan analisa getaran. Untuk masalah yang non-struktural seperti heat transfer untuk mencari perpindahan panas mencari nilai temperature oleh flux temperature dan Fluid flow yang digunakan untuk mencari nilai tekanan oleh flux fluida.

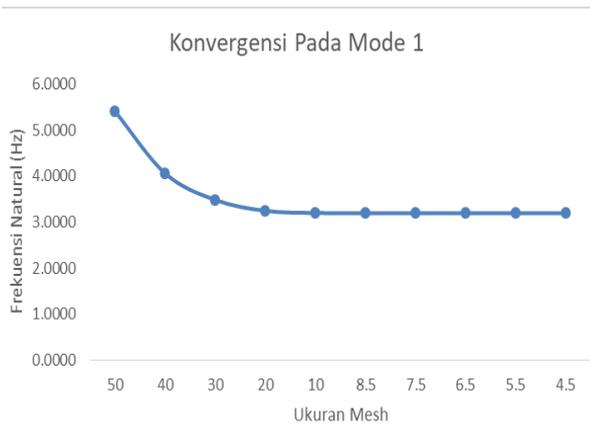
Kelebihan dari penggunaan Metode Elemen Hingga yaitu; (1) Bentuk irregular yang dapat dimodelkan; (2) Kondisi beban secara umum dapat ditangani dengan mudah; (3) Model dapat disusun dengan material yang beragam, karena persamaan element dievaluasi secara individu; (5) Kondisi dan jumlah batasan yang dapat disesuaikan dengan berbagai macam kondisi; (5) Variasi ukuran elemen dapat dianalisa hingga elemen terkecil dari model elemen hingga; (6) Perubahan bentuk model dapat dilakukan dengan mudah dan murah; (7) Efek dinamika; (8) Dapat dengan mudah menganalisa pada deformasi yang besar dan non-linier material. Terdapat dua metode pendekatan umum dalam elemen hingga yang diaplikasikan terhadap masalah struktur, yaitu :

1) Metode fleksibilitas, gaya internal sebagai variable

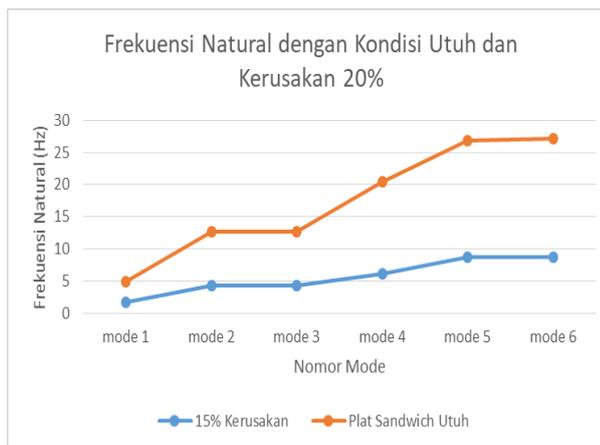
Metode fleksibilitas, gaya internal sebagai variable yang harus dicari (unknown). Menggunakan persamaan keseimbangan untuk mendapatkan persamaan pengatur (governing equation). Kemudian, persamaan lainnya didapat dengan memberikan syarat kompatibilitas (compatibility equations).

2) Metode Kekakuan/Perpindahan (Displacement

Metode Kekakuan/Perpindahan (Displacement Stiffness Method). Pada metode ini perpindahan titik simpul atau nodes digunakan sebagai variable yang harus dicari (unknown). Syarat kompatibilitas mengharuskan elemen yang berhubungan (connected) akan tetap berhubungan setelah mengalami deformasi. Untuk kebutuhan komputasi, metode



Gambar 6. Grafik Konvergensi pada Mode 1.



Gambar 7. Grafik Hasil Frekuensi Natural Kondisi plat utuh dan mengalami kerusakan 20%.

kekakuan (Displacement Stiffness Method) lebih sederhana untuk masalah struktur daripada metode fleksibilitas..

D. Analisa frekuensi Natural

Pada tahap analisa frekuensi natural, didapat dari hasil studi konvergensi. Dimana ukuran elemen yang telah didapat digunakan untuk variasi besar dan variasi lokasi kerusakan. Kerusakan mengakibatkan penurunan frekuensi natural. Hal ini sesuai dengan rumus frekuensi natural dan hasil penelitian Y.Yan, L, et.al (2007), bahwa terjadinya kerusakan mengakibatkan pengurangan kekakuan (stiffness) [8]. Lalu pengurangan kekakuan tersebut mengakibatkan penurunan frekuensi natural. Atau dengan kata lain, kerusakan yang semakin besar mengakibatkan penurunan kekakuan plat sandwich. Sehingga penurunan kekakuan tersebut mengakibatkan terjadinya penurunan frekuensi natural. Dapat ditunjukkan pada rumus (1) :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{1}$$

Dimana ω_n (Hz) adalah nilai natural frekuensi, k yaitu konstanta pegas, m menunjukkan massa dari beban benda. Setelah itu mencari besar penurunan nilai frekuensi natural (%). Karena semakin besar kerusakan, maka penurunan nilai frekuensi natural semakin besar. Hasil ini terkonfirmasi berdasarkan penelitian [7]. Dengan menggunakan rumus (2) :

$$\Delta_{\omega} = \frac{|\omega_D - \omega_I|}{\omega_I} 100\% \tag{2}$$

Tabel 5.
Hasil Nilai Frekuensi Natural pada Mode 1

No.	Ukuran Mesh	Nilai Frekuensi Natural (Hz)
1.	50 mm	5.4035
2.	40 mm	4.0589
3.	30 mm	3.4833
4.	20 mm	3.2480
5.	10 mm	3.2003
6.	8,5 mm	3.1988
7.	7,5 mm	3.1961
8.	6,5 mm	3.1957
9.	5,5 mm	3.1958
10.	4,5 mm	3.1956

Tabel 6.
Hasil Nilai Frekuensi Natural kondisi Plat Sandwich Utuh dan Kerusakan 20%

Nomor Mode	20% Kerusakan	Plat Sandwich Utuh
1	1.7514 Hz	3.1956 Hz
2	4.2507 Hz	8.4646 Hz
3	4.2514 Hz	8.4646 Hz
4	6.0492 Hz	14.418 Hz
5	8.6477 Hz	18.2590 Hz
6	8.7243 Hz	18.4550 Hz

Tabel 7.
Penurunan Nilai Frekuensi Natural Akibat 20% Kerusakan

Nomor Mode	Penurunan Nilai Frekuensi Natural (%)
Mode 1	45,19%
Mode 2	49,78%
Mode 3	49,77%
Mode 4	58,04%
Mode 5	52,64%
Mode 6	52,73%

Rumus diatas diartikan, Δ_{ω} (%) adalah penurunan nilai frekuensi natural yang mengalami kerusakan pada material, ω_D adalah nilai frekuensi natural pada plat sandwich yang mengalami kerusakan (Hz), ω_I yaitu nilai frekuensi natural plat sandwich utuh atau tidak mengalami kerusakan (Hz). Selanjutnya, mencari parameter frekuensi besar kerusakan. Dimana untuk menggambarkan kerusakan lokal identifikasi kerusakan dari core sandwich yang mengalami kerusakan, berikut frekuensi parameter didefinisikan :

$$K = \frac{f_D}{f_I} \tag{3}$$

Dimana f_D menunjukkan nilai frekuensi natural yang mengalami kerusakan pada struktur plat sandwich, dan f_I nilai natural frekuensi pada plat sandwich yang utuh.

E. Identifikasi Kerusakan

Jika struktur mengalami suatu kerusakan, maka parameter struktur akan berubah [9]. Identifikasi kerusakan perlu dianalisis untuk mengetahui pengaruh karakteristik material sandwich sebelum diaplikasikan ke struktur kapal. identifikasi pada material dapat dilakukan dengan metode merusak (Destructive test) dan metode tidak merusak (Non Destructive Test). Penggunaan metode NDT banyak dilakukan karena tidak merusak struktur dan dapat diaplikasikan langsung pada struktur terkait. Proses pengujian NDT memiliki 2 jenis yang mencakup daerah objek pengujian yaitu NDT Lokal dan NDT global. Objek tinjauan lokal pada dasarnya digunakan untuk mendeteksi kerusakan pada titik-titik tertentu dalam sebuah struktur. NDT lokal tidak membutuhkan data awal, seperti data

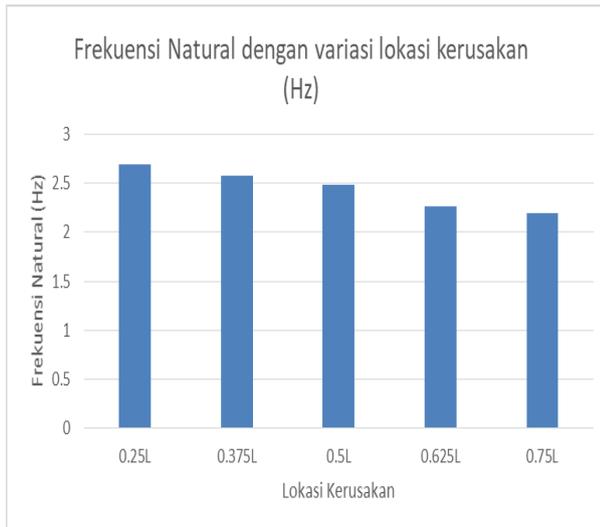
Tabel 8.

Hasil Nilai Frekuensi Natural akibat Perbedaan Lokasi Kerusakan		
No	Lokasi Kerusakan	Nilai Frekuensi Natural (Hz)
1	0,25 L	2,6909
2	0,375 L	2,5791
3	0,5 L	2,4885
4	0,625 L	2,2666
5	0,75 L	2,1897

Tabel 9.

Nilai Parameter Frekuensi Natural akibat Perbedaan Lokasi Kerusakan

Lokasi Kerusakan	0.25L	0.375L	0.5L	0.625L	0.75L
Parameter	0.79	0.76	0.73	0.67	0.64



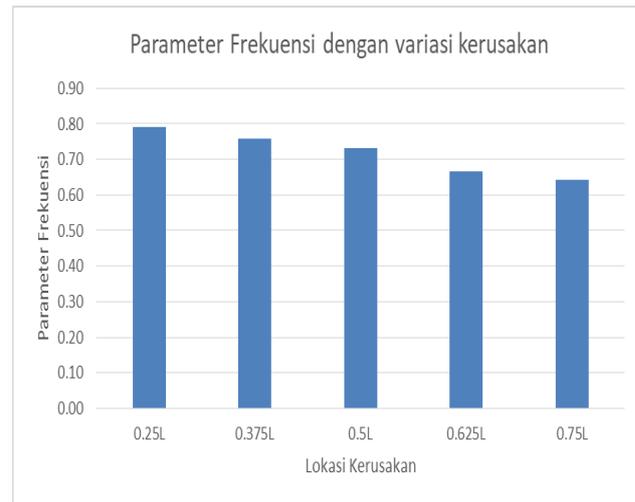
Gambar 8. Diagram Nilai Frekuensi Natural akibat Perbedaan Lokasi Kerusakan.

baseline, karakteristik frekuensi material tanpa kerusakan, atau model teoritis dari struktur material tanpa kerusakan yang diaplikasikan struktur ukuran kecil. Namun, pada struktur yang berukuran besar, bentuk struktur yang kompleks, ataupun struktur yang sulit diakses, seperti lambung kapal, sangat sulit melakukan deteksi kerusakan menggunakan metode NDT lokal. Identifikasi kerusakan lambung kapal lebih sesuai menggunakan metode NDT global. Metode NDT global memungkinkan engineer untuk melakukan inspeksi lambung kapal yang kompleks dengan lebih menyeluruh dan melakukan deteksi kerusakan lebih awal saat kapal sedang beroperasi normal tanpa operator harus melakukan inspeksi struktur secara berkala (online damage detection). Sebuah teknik identifikasi kerusakan dengan NDT global berbasis getaran telah diusulkan beberapa peneliti. Teknik ini dikembangkan berdasarkan prinsip bahwa semua struktur dapat dinyatakan sebagai sistem dinamik dengan tingkat kekerasan, massa, dan konstanta redaman tertentu.

III. METODOLOGI

A. Dimensi Ukuran Plat Sandwich

Dimensi ukuran pada penelitian ini dimodelkan sesuai dengan lebar pelat kapal pada umumnya. Tetapi model diasumsikan lebih sederhana dengan bentuk persegi, panjang dan lebar disamakan. Agar proses running dan ketelitian dari hasil lebih baik. Detail dari dimensi model dapat dilihat dari Gambar 3.



Gambar 9. Diagram Parameter Frekuensi Lokasi Kerusakan.

1) Face Plate (Pelat Baja)

Face Plate (Pelat Baja) terdiri dari:

Lebar : 750 mm

Panjang : 750 mm

Tebal : 4 mm

2) Core material (polyurethane) terletak diantara 2 pelat baja.

Core Material (polyurethane) terletak diantara 2 pelat baja terdiri dari:

Lebar : 750 mm

Panjang : 750 mm

Tebal : 20 mm

Penentuan ukuran plat sandwich berdasarkan jarak stiffener pada kapal 17500 Double Hull LTDW yaitu 750 mm.

B. Input Data Material

Pengumpulan data dilakukan untuk mengambil data yang diperlukan dalam mengerjakan penelitian ini membutuhkan pembuatan model dan specimen berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya pada plat sandwich. Hal-hal yang menjadi bahan acuan peneliti dalam penelitian ini juga mengacu pada hasil penelitian. Beberapa hal yang dapat diambil sebagai data awal penelitian adalah: (a)Komposisi material baja A36 dan core material Polyurethane elastomer; (b)Karakteristik material plat sandwich; (c)Ketebalan plat yang digunakan; (d)Nilai Densitas material baja dan Polyurethane; (f)Young Modulus; (g)Poisson Ratio. Nilai dari densitas, young modulus, dan poisson ratio pada tiap material dapat dilihat pada Tabel 1.

Pada penelitian ini menggunakan variasi pengurangan volume kerusakan buatan pada material core plat sandwich, dimana pengurangan volume dapat dilihat respon perbandingan displacement pada tiap pengurangannya. Prosentase pengurangan dapat dilihat pada Tabel 2.

C. Pemodelan

Model yang digunakan yaitu besar kerusakan 20% pada Tabel 3, serta 5 variasi lokasi kerusakan pada Tabel 4.

D. Spring Element pada Model

Pada penelitian ini menggunakan elemen pegas (spring element) dibagian kerusakan buatan. Bertujuan agar elemen antara face plat dan core material tidak mengalami kecacatan saat proses running pada model. Hasil dapat dilihat pada

Gambar 4.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Konvergensi

Studi konvergensi yang dilakukan pada penelitian ini untuk menentukan ukuran elemen yang digunakan ketika membuat mesh pada model. Dimana dalam literatur mengenai metode elemen hingga (MEH), sering dikatakan untuk mengetahui akurasi dari solusi elemen hingga semakin meningkat apabila jumlah elemen yang digunakan semakin banyak. Tetapi, penggunaan elemen yang banyak dapat berpengaruh pada waktu yang dibutuhkan saat proses komputasi. Konvergensi diperlukan untuk mencari suatu nilai yang mendekati nilai sebenarnya pada kondisi nyata. Model pada analisa terdiri dari banyak mesh yang membentuk struktur plat sandwich. Ukuran dari mesh yang tepat perlu dicari agar nilai dari analisa mendekati kondisi nyata dan kapasitas perangkat yang digunakan tetap memadai. Agar pengerjaan efektif dan sesuai dengan waktu yang dibutuhkan. Ada beberapa tahapan untuk melakukan konvergensi yaitu :

1) Pemilihan Ukuran mesh

Untuk permodelan ini, dilakukan meshing dengan ukuran awal 50 mm dan selanjutnya ukuran mesh dikurangi menjadi 40 mm, 30 mm, 20 mm hingga 10 mm. Dikarenakan ukuran mesh masih dapat diperkecil agar mendapatkan hasil yang konvergen, ukuran mesh diperkecil menjadi 8,5 mm, 7,5 mm, 6,5 mm, 5,5 mm hingga 4,5 mm. Dimana pada kondisi ukuran mesh 4,5 mm sudah konvergen. Langkah-langkah yang dilakukan untuk melakukan perubahan ukuran mesh sebagai berikut; (1) Mesh pada ukuran awal yang telah di-running dan dibaca hasilnya lalu dihapus. Pertama hapus mesh untuk area dengan perintah clear. Setekah itu menghapus elemen garis pada modul mesh; (2) Masukkan ukuran mesh baru yang dilakukan saat langkah pembuatan mesh, namun tidak perlu mesh attribute; (3) Untuk menentukan ukuran mesh, perlu diketahui bahwa mesh area itu terbagi berdasarkan ukuran mesh pada garis yang mengelilinginya. Perbedaan ukuran mesh 10mm dan 4,5 mm dapat dilihat pada Gambar 5.

Untuk mengetahui nilai hasil frekuensi natural untuk sebuah nodal yaitu dengan memilih perintah *query result*. Untuk mengetahui jumlah *mesh* atau elemen pada model menggunakan perintah *list element* atau *list nodal*. Setelah itu akan terlihat berapa jumlah elemen *beam* dan berapa jumlah elemen *shell*. Setelah hasil dari tegangan dan jumlah *mesh* diketahui, disusun dalam grafik. Berikut adalah hasil rekapan dalam grafik dari ukuran mesh 50 mm hingga 4,5 mm. Ditunjukkan pada Gambar 6 dan Tabel 5.

Hasil diatas menunjukkan nilai frekuensi natural pada ukuran mesh 4,5 mm sudah menunjukkan hasil yang konvergen. Dimana nilai frekuensi natural pada mesh 4,5 mm sudah stabil. Pada grafik juga menunjukkan penurunan nilai terbesar pada ukuran mesh 40 mm ke 30 mm. Penurunan nilai pada mesh 40 mm tersebut juga menunjukkan kestabilan nilai frekuensi natural pada ukuran mesh setelahnya. Hingga mendapatkan nilai ukuran mesh yang paling optimal dan konvergen yaitu pada ukuran mesh 4,5 mm.

B. Hasil Nilai Frekuensi Natural kerusakan 20%

Kerusakan yang dapat mengakibatkan penurunan nilai frekuensi natural pada plat *sandwich*. Dilakukan dengan kondisi plat utuh dan kerusakan 20%. Simulasi dilakukan dari mode 1 hingga mode 6. Hasil dari analisa yang telah dilakukan dapat dilihat pada Gambar 8 dan Tabel 6.

Dari Gambar 7 hasil grafik diatas dan hasil tabel nilai natural frekuensi mengalami penurunan pada setiap penambahan besar kerusakan. Dimana semakin besar kerusakan maka nilai natural frekuensi semakin turun. Hal ini sesuai dengan rumus frekuensi natural dari hasil penelitian Y.Yan, L, et al (2007), bahwa terjadinya kerusakan mengakibatkan pengurangan kekakuan atau stiffness pada material [8]. Lalu pengurangan kekakuan tersebut mengakibatkan penurunan frekuensi natural. Atau dengan kata lain, kerusakan semakin besar mengakibatkan penurunan kekakuan plat sandwich. Sehingga penurunan kekakuan tersebut mengakibatkan terjadinya penurunan frekuensi natural. Kerusakan semakin besar \rightarrow kekakuan turun \rightarrow frekuensi natural turun.

C. Persentase Penurunan Frekuensi Natural (PPFN) akibat Besar Kerusakan

Penurunan nilai akibat adanya kerusakan dilakukan untuk mengidentifikasi mode berapa yang menunjukkan mode paling sensitif. Dimana mode ini dapat dijadikan parameter frekuensi natural untuk mengidentifikasi besar dan lokasi kerusakan pada plat sandwich. Hasil dari penurunan nilai dapat dilihat pada Tabel 7.

Dari hasil diatas terlihat penurunan nilai paling besar yaitu pada mode 4 dengan pengurangan nilai frekuensi natural sebesar 58,04 %. Maka dapat disimpulkan bahwa mode 4 memiliki mode yang paling sensitif karena besar penurunan nilai frekuensi naturalnya dibandingkan dengan mode lainnya. Semakin besar kerusakan, penurunan nilai frekuensi natural semakin besar. Hasil ini terkonfirmasi berdasarkan penelitian [7]. Dengan demikian, mode 4 dijadikan acuan untuk mendeteksi besar dan lokasi kerusakan dengan menggunakan Parameter Frekuensi Natural [8].

Parameter frekuensi besar kerusakan diambil pada mode 4, dimana pada mode ini memiliki sensitifitas paling tinggi untuk dapat mengidentifikasi kerusakan. Untuk mengetahui refleksi efek dari kerusakan local pada frekuensi natural dari suatu struktur plat *sandwich* dilakukan parameter frekuensi besar kerusakan agar mengetahui perbandingan nilai kerusakan agar mengetahui perbandingan nilai kerusakan dengan kondisi plat *sandwich* yang utuh.

D. Hasil Nilai Frekuensi Natural akibat Perubahan Lokasi Kerusakan

Nilai frekuensi natural akibat perubahan lokasi kerusakan dengan jarak 0,25 L, 0,375 L, 0,5 L, 0,625 L dan 0,75 L didapat pada mode 4. Karena mode ini menunjukkan nilai paling sensitif untuk mengidentifikasi kerusakan. Maka dari itu, untuk mencari nilai frekuensi natural akibat perubahan lokasi kerusakan dilakukan pada mode 4. Hasil nilai natural frekuensi dapat dilihat pada Gambar 8 dan Tabel 8.

Hasil diatas menunjukkan penurunan nilai pada setiap lokasi kerusakan setiap penambahan jarak kerusakan yang apabila semakin jauh dari tumpuan jepit (clamped) maka nilai

frekuensi natural semakin turun, Dimana identifikasi lokasi kerusakan mempengaruhi penurunan nilai frekuensi natural. Penurunan nilai pada tiap jarak lokasi kerusakan berkurang $\pm 0,1$ Hz pada tiap variasi kerusakan yang semakin menjauhi tumpuan jepit (clamped).

E. Parameter Frekuensi Lokasi Kerusakan

Parameter Frekuensi akibat perubahan lokasi kerusakan sama seperti parameter besar kerusakan. Dimana parameter dibandingkan dengan kondisi lokasi kerusakan dengan plat sandwich yang utuh. Hasil dari nilai parameter frekuensi natural akibat perubahan lokasi kerusakan dapat dilihat pada Gambar 9 dan Tabel 9.

Hasil dari parameter diatas menunjukkan penurunan nilai akibat perbedaan lokasi. Dimana nilai parameter turun sebesar $\pm 0,3$ hingga $0,4$ kondisi ini menunjukkan pada setiap parameter lokasi kerusakan mengalami penurunan yang cukup stabil. Parameter menjadi acuan untuk menentukan diidentifikasi pada lokasi kerusakan. Ditunjukkan juga pada grafik pada Gambar 9 penurunan nilai parameter linear. Dari hasil parameter ini kita dapat mengidentifikasi dimana lokasi rusak buatan. Apabila parameter perbandingan pada lokasi kerusakan dengan plat utuh berada dinilai $0,7$ maka dapat diidentifikasi bahwa kerusakan terjadi pada lokasi $0,5$ L. Parameter ini juga sebagai estimasi untuk mengetahui lokasi kerusakan pada setiap hasil variasi kerusakan diatas. Identifikasi kerusakan menunjukkan apabila nilai parameter semakin kecil maka lokasi kerusakan semakin jauh dari kondisi batas dengan tumpuan jepit (clamped). Dimana pada lokasi kerusakan $0,25$ L adalah kerusakan yang paling dekat dengan tumpuan jepit (clamped) pada analisa permodelan yang dilakukan pada penelitian ini.

V. KESIMPULAN

Setelah dilakukan percobaan dan penelitian maka kesimpulan sebagai berikut;(1)Penambahan volume kerusakan pada core mempengaruhi nilai frekuensi natural pada plat sandwich. Semakin besar kerusakan maka nilai frekuensi natural suatu struktur semakin turun. Perbedaan

lokasi kerusakan pada setiap variasi jarak yang telah dilakukan pada penelitian, semakin jauh kerusakan dari kondisi batas pada satu tumpuan jepit (clamped) maka nilai frekuensi natural semakin turun; (2)Penurunan nilai frekuensi natural paling besar pada mode 4. Dimana mode ini menunjukkan paling sensitif diantara mode lainnya. Mode 4 menjadi acuan untuk mencari nilai lokasi kerusakan serta parameter untuk mengidentifikasi kerusakan; (3)Identifikasi pada plat sandwich yang mengalami rusak buatan yaitu dengan menggunakan parameter kerusakan. Parameter ini dapat mengestimasi berapa besar kerusakan dan dilokasi mana kerusakan terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] M. J. Jweeg, A. S. Hammood, and M. Al-Waily, "Experimental and numerical study of oblique crack effect on natural frequency of different composite plate structure types," *Asian Trans. Eng.*, vol. 2, no. 5, pp. 81–91, 2012.
- [4] S. CORE, "Best practice guide for sandwich structures in marine applications," England, 2013.
- [5] S. H. Sujiantanti, A. Zubaydi, and A. Budipriyanto, "Finite element analysis of ship deck sandwich panel," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 874, no. January 2019, pp. 134–139, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.874.134.
- [6] M. S. Purwoko, "Analisis statis dan dinamis sandwich panel berbahan core material limbah cangkang telur pada konstruksi pelat datar kapal," Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2017.
- [7] A. Zubaydi, A. Budipriyanto, E. Utomo, and S. H. Sujiantanti, "Development of sandwich core material for deck structure," *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 11, pp. 2551–2560, 2018, doi: 10.12962/j23546026.y2017i6.3237.
- [8] Y. J. Yan, L. Cheng, Z. Y. Wu, and L. H. Yam, "Development in vibration-based structural damage detection technique," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, no. 5, pp. 2198–2211, 2007, doi: 10.1016/j.ymsp.2006.10.002.
- [9] J. Lou, L. Wu, L. Ma, J. Xiong, and B. Wang, "Effects of local damage on vibration characteristics of composite pyramidal truss core sandwich structure," *Compos. Part B Eng.*, vol. 62, pp. 73–87, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2014.02.012.