Analisis *Multiple Damages* Pada Konstruksi Geladak Kapal Berbahan *Sandwich Panel* Dengan Respon Getaran

Windra Iswidodo¹, Anauta Lungiding A.R.²

^{1,2} Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Negeri Madura, Jl. Raya Taddan Km 4 Camplong, Sampang, 69281, Indonesia
E-mail: iswidodo@poltera.ac.id

Abstrak

Saat ini banyak terobosan baru dalam teknologi material, salah satunya adalah penggunaan material *Sandwich Panel* untuk konstruksi kapal. *Sandwich Panel* merupakan material ringan yang terdiri dari dua pelat baja yang dipisahkan oleh bagian inti (*core*). Material *Sandwich Panel* pada kapal akan mendapat gaya berulang dari luar, hal tersebut akan memicu adanya retak dan kemudian dapat menyebabkan kegagalan pada material. Analisa dengan *Finite Element Modeling* dilakukan untuk validasi kekuatan material *Sandwich Panel*. Selanjutnya, akan dilakukan identifikasi dampak *multiple damages* melalui pendekatan karakteristik getaran dengan metode eksperimen dan analisa *finite elemen*. Berdasarkan hasil penelitian, pengaruh cacat pada *core Sandwich Panel* berdasarkan hasil eksperimen terjadi penurunan rata-rata frekuensi natural sebesar 1,64 persen.

Kata Kunci: *Core Material; Kerusakan Jamak; Pengujian Getaran; Sandwich Panel*

Abstract

Now aday, lot of new breakthroughs in material technology. One of the them is the use of Sandwich panel Material. Sandwich panel is a material that consist of two steel plates separated by a core part. On its application on ship, Sandwich panel will get repetitive force from the outside. This research will identify multiple damages with vibration characteristic approach with the experimental method and finite element analysis. Effect of defect on Sandwich Panel core material based on the experimental result is a decrease in natural frequency means of 1.64 percent.

Keywords: *Core Material; Multiple Damages; Sandwich Panel; Vibration test*

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi menuntut pelaku industri perkapalan untuk dapat melakukan inovasi dalam menghasilkan material baru. Tujuannya adalah untuk dapat menerapkan *eco green* pada tahap pembangunan kapal, seperti yang diketahui bahwa material pembuatan kapal saat ini sangat mengalami perkembangan dan pergeseran. Jadi, tidak hanya menggunakan material baja saja, begitupun pula dengan sistem konstruksi geladak pada kapal penumpang yang membutuhkan material maju guna memberikan hasil material lebih ringan, kuat, dan tahan lama yang tingkat korosinya rendah.

Penggunaan material baja pada konstruksi geladak kendaraan kapal saat ini sangat rentan terhadap pengaruh lingkungan serta kekuatan yang dimilikinya belum mampu membuat geladaka kendaraan dapat beropesari lama tanpa adanya perbaikan dan perawatan. Oleh karena itu, berhubungan dengan hal perawatan yang dilakukan pada konstruksi kapal maka diperlukan material baru yaitu *Sandwich Panel* yang diharapkan dapat menggantikan material baja pada sistem konstruksi kapal.

Penggunaan material *sandwich* pada bidang perkapalan adalah pembangunan kapal Ro-Ro *Pride of Cherbourg* yang diawasi oleh LR *class*. Pada tahap penggunaanya material *sandwich* difokuskan pada *wing bulkhead* dan tangga

akomodasi. Seiring dengan jalannya waktu penggunaan material *sandwich* saat ini telah dapat diterapkan pada geladak kapal pesiar *Superstar Virgo* [1,2]. Pada penelitian lain disebutkan bahwa perubahan penggunaan material baja terhadap material *sandwich* mampu mereduksi berat kapal sekitar 5 – 12 persen [3]. Penggunaan material *sandwich plate* yang terdiri dari dua bagian yaitu *faceplates* dan *core* (*core*). Material *faceplates* harus lebih kaku dan kuat dibandingkan dengan *core*. Sedangkan *core* dibuat dengan karakteristik yang memiliki kelenturan yang tinggi, ringan, dan memiliki kekuatan yang rendah. Kedua kombinasi material ini dapat digunakan pada industri perkapalan saat ini untuk mewujudkan material ramah lingkungan yang dipakai pada badan kapal [4].

Pengurangan berat konstruksi dan hasil tegangan berdasarkan model *finite element* dapat terlihat dalam aplikasi penggunaan material *sandwich panel*, dimana penerapan pada geladak kapal penumpang. Pemilihan *core* dan hasil pengujian yang telah dilakukan untuk *Sandwich Panel*, *core* yang digunakan dalam lapisan *Sandwich Panel* adalah *Syntheticresin* dengan komposisi 50 persen Resin, 50 persen Talc dan 0.3 persen Catalyst. Nilai densitas material 1728 kg/m³, Tensile strength 24.75 Mpa, Modulus elastisitas 546.95 Mpa, dan Modulus geser 273.48 Mpa. Dari hasil penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa material *Sandwich Panel* dapat menggantikan sistem

konstruksi pada geladak kapal dengan pengurangan berat konstruksi 13,08 persen dari geladak dengan sistem konstruksi konvensional menggunakan pelat baja [5].

Struktur kapal yang dibangun menggunakan *Sandwich Panel* lebih ringan selain itu dibangun dengan menggunakan struktur baja. Tekanan struktur panel sandwich juga berkurang dari struktur baja konvensional dan mereka berada di bawah tegangan leleh material; menjadi tegangan panel sandwich jauh lebih rendah daripada tegangan luluh [6].

Core berbahan polyurethane dikembangkan secara eksperimental untuk pelat *sandwich* kapal dan telah dilakukan identifikasi kerusakan berbasis getaran untuk pelat *sandwich* kapal menggunakan Metode Elemen Hingga. *Core* yang dikembangkan telah memenuhi standar yang ditetapkan oleh LR dan IMO. Analisis pengaruh rasio kerusakan terhadap deviasi frekuensi natural menunjukkan bahwa semakin besar ukuran kerusakan, semakin tinggi penyimpangan frekuensi alaminya. Jika terdapat deviasi frekuensi alami tertentu pada kapal maka ukuran kerusakan dapat diprediksi [7].

Dampak perubahan frekuensi natural pada *Sandwich Panel* akibat kerusakan pada *core* dan *damping ratio* yang terjadi pada material. Perubahan nilai frekuensi natural yang terjadi pada kondisi utuh dan kondisi cacatnya adalah 8 Hz pada mode 1 dan 94 Hz pada mode 2. Sedangkan nilai *damping ratio* dipengaruhi oleh ketebalan material inti (*core*) dari *Sandwich Panel*. Pada *sandwich panel* dengan cacat sebagian, *damping ratio* turun 17.11 persen dan pada material cacat penuh *damping ratio* turun 25.75 persen pada nilai rata-ratanya [8].

Penggunaan pelat *sandwich* lebih menguntungkan dibandingkan penggunaan pelat konvensional dari segi kekuatan dan konstruksi kapal. Dari penggunaan bahan *core* bubuk sekam dan resin diperoleh penurunan frekuensi natural. Selain itu *damping ratio* pada material tersebut juga mengalami penurunan masing-masing 0.39 persen dan 5.39 persen dari material lainnya [9].

Pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh material *Sandwich Panel* pada struktur kapal setelah diberi kerusakan pada *core* melalui pendekatan karakteristik getaran, penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimen dan pemodelan Finite Elemen.

II. METODELOGI

Metodologi pada penelitian ini digambarkan pada bagan alir berikut ini.

Gambar 1. Diagram Alir penelitian

Pada Gambar 1 menunjukkan alur penelitian yang dilakukan dimana pengujian material *Sandwich Panel* dengan karakteristik getaran pada eksperimen laboratorium yang selanjutnya dibandingkan dengan hasil pemodelan elemen hingga untuk mengetahui perbedaan hasil pengujian. Tahapan eksperimen laboratorium untuk mengetahui karakteristik getaran spesimen seperti pada Gambar 2 berikut ini.

Gambar 2. Set up penelitian yang digunakan dalam pengujian

Pengujian ini menggunakan *Experiment Modal Analysis* dengan metode *impact input* dan *piezoelectric accelerometer*. Gambar 2 menggambarkan bagan alur pengujian untuk mendapatkan karakteristik dinamis respon getaran dari material *sandwich panel*. Pengujian getaran bertujuan untuk mengetahui karakteristik dinamis dari material *sandwich panel* itu sendiri. Pada pengujian ini dilakukan pengambilan data untuk setiap posisi *hammer* sebanyak 12 kali. Gambar 3 berikut adalah ilustrasi pengambilan data dari pengujian getaran material *sandwich panel*.

Gambar 3. Ilustrasi pengambilan data

Ilustrasi pada Gambar 3 merupakan metode pengambilan data *mode* pengujian getaran. Spesimen di beri garis dengan jarak 20 mm membentuk kotak-kotak seperti diatas. Segitiga hitam menunjukkan posisi eksitasi *hammer* pada panel sedangkan titik-titik merah menunjukkan posisi *accelerometer*. Posisi pengambilan data diatas diambil sebanyak mungkin, agar mode getaran yang terjadi pada panel dapat terambil datanya pada pengujian ini.

Berdasarkan data yang didapat dari pengujian tidak bisa langsung digunakan sebagai bahan analisa. Pengolahan data berdasarkan Gambar 4 dilakukan dibantu dengan *software* matematis guna menentukan nilai frekuensi natural, koefisien damping, dan nilai koherensi

Gambar 4. Pengolahan data hasil eksperimen

Gambar 4 menggambarkan bagan dalam proses pengolahan data yang didapat dari pengujian getaran akan terekam pada *analyser*. Tahap peratama, data yang terekam pada *analyser* berupa dimensi signal listrik, untuk merubah terhadap dimensi yang lebih familiar maka perlu dilakukan konversi. Konversi pada tahap ini diapat melalui data sensitifitas dari *accelerometer* dan *hammer* yang digunakan dalam penelitian. Adapun data sensitifitasnya adalah

- *Accelerometer sensitivity* : $\frac{10,32}{9,8} \text{ mv} / \text{ms}^2$
- *Hammer sensitivity* : $1,148 \text{ mv} / \text{ms}^2$

Kemudian untuk mempermudah analisa hasil, percepatan sebagai *output* pada *accelerometer* dikonversi menjadi *displacement* atau perubahan menggunakan formula

$$x = \frac{\alpha}{2\pi^2 f^2} \quad (1)$$

Force yang digunakan harus memenuhi hingga frekuensi yang akan diidentifikasi, apabila tidak memenuhi dilakukan pengujian ulang. Kemudian *spectrum displacement* berdasarkan *frekuensi domain* dapat diidentifikasi dan dilakukan pengolahan data untuk mendapatkan karakteristik dinamis dari material tersebut.

Jumlah *peak* yang terdapat pada pengujian terkadang banyak dan sulit dibedakan, maka dilakukan proses verifikasi *peak* menggunakan sudut fase, secara teori sudut fase pada sebuah mode getaran akan berubah sebanyak -180° . Ini menandakan perubahan drastis dari positif ke negative atau sebaliknya. Jika *peak* yang diestimasi menunjukkan perubahan sudut fase, maka dapat diambil kesimpulan bahwa *peak* pada frekuensi tersebut merupakan frekuensi natural dari *sandwich panel* [10].

Selanjutnya spesimen akan dibuat cacat secara jamak (*multiple damages*). Kerusakan pada *core* berbentuk melintang sepanjang 40 mm dan dilanjutkan dengan kerusakan berbentuk vertikal setinggi tebal dari *core* yaitu 20 mm. Masing-masing cacat yang dibuat memiliki kedalaman 35 mm. Gambar 5 menunjukkan proses pembuatan cacat pada *core* dari material *sandwich panel*.

Gambar 5. Cacat pada *core sandwich panel*

Pemodelan yang dilakukan untuk dapat divalidasikan dan sarana informasi dalam proses pengujian secara eksperimen yang dilakukan. Sehingga dengan metode validasi antara eksperimen dan pemodelan dapat menunjukkan karakteristik material *sandwich panel* melalui respon getaran

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Identifikasi Material Sandwich Panel

Pemilihan jenis *core* yang dilakukan pada penelitian ini dilakuka berdasarkan dari aspek hasil karakteristik material yang telah dilakukan. Pada Tabel 1 disajikan karakteristik dari *core* pada *sandwich panel* untuk mendapatkan nilai terbaik sehingga dapat dilakukan pemodelan kerusakan jamak pada *sandwich panel*.

Nilai densitas dari material sandwich panel lebih ringan 50,67 persen dari densitas material baja. Pada nilai modulus elastisitas pada setiap *core* material telah memenuhi kriteria DNV dan mengalami kenaikan pada masing-masing jenis *core* material sebesar 8,38persen. Perbedaan nilai ini

diakibatkan oleh metode pembuatan *core* dan sifat dari talac yang memberikan sifat kekakuan lebih pada *core* apabila diberikan dengan jumlah yang lebih besar.

Nilai modulus geser pada *core A* sebesar 110,86 Mpa dimana nilai ini berada dibawah nilai minimal yang diberikan oleh LR dan DNV yaitu 120 Mpa. Kemudian aspek terakhir adalah hasil analisa pembebanan pada pengujian lentur didapatkan bahwa kekuatan nilai maksimal tegangan lentur sebagai acuan pada pemodelan struktur geladak kendaraan.

TABEL 1
HASIL MODAL ANALYSIS PADA SANDWICH PANEL

Core Material	Densitas (kg/m ³)	Modulus Tarik (Mpa)	Modulus Geser (Mpa)	Flexure Stress (Mpa)
Core A	3.675,17	254.65	110,86	88,93
Core B	3.702,56	307.17	121,28	105,75
Core C	3.973,74	325.43	135,00	116,14
Core D	4.181,20	333.55	144,17	118,97

Berdasarkan hasil identifikasi material *sandwich panel* yang telah dilakukan sebelumnya didapatkan bahwa semua jenis *core material* memenuhi kriteria dan validasi pembebanannya. Sehingga pada tahap ini jenis *core material* yang akan dilakukan identifikasi adalah jenis *core material A* dan D. pemilihan ini didasarkan oleh kriteria batas atas dan batas bawah dari komposisi pada *core* dari *sandwich panel* [11]. Pemilihan *core A* dan *core D* dilakukan berdasarkan nilai komposisi talac pada setiap spesimen, hal ini dilakukan karena *core A* tidak memenuhi kriteria modulus geser yang ditetapkan oleh LR dan DNV.

B. Pemodelan Sandwich Panel

Analisa menggunakan analisa pemodelan dilakukan selain sebagai referensi dalam proses verifikasi hasil ekperimental. Pada percobaan ini, *mode* getaran yang diidentifikasi hanya dibatasi hingga *mode* ke-2, hal ini dilakukan sebagai pembantu dalam proses identifikasi frekuensi natural dan sebagai verifikasi hasil frekuensi natural yang didapat dalam pengujian ekperimental *sandwich panel*.

Bentuk *mode* getaran yang terjadi pada spesimen uji, pada *mode* ke-1 memiliki satu gelombang dengan arah memanjang pada benda. Sedangkan untuk *mode* ke-2 memiliki 2 bentuk gelombang juga kearah memanjang pada benda uji. Pada Gambar 6 merupakan gambar hasil pemodelan *sandwich panel* dengan dimensi 200 x 100 mm.

Gambar 6. Mode getaran yang terjadi pada panel, a) mode ke-1; b) mode ke-2; c) model kondisi cacat pada mode ke-1

Kondisi pada pemodelan *modal analysis* yang dilakukan adalah kondisi jepit pada semua sisi dari panel. Hal ini diberikan karena disesuaikan dengan kondisi pada saat melakukan pengujian. Model selanjutnya akan dirusak sesuai kondisi pengujian. Ukuran dari cacat yang dibuat adalah 40 mm berbentuk melintang dengan ketinggian 5 mm, kemudian kerusakan material dibuat secara vertikal setinggi tebal *core* 20 mm dengan lebar 8 mm. kedalaman cacat yang dibuat pada model adalah 35 mm sesuai dengan kemampuan maksimal dari mata bor yang dipakai untuk membuat cacat pada material *sandwich panel* untuk pengujian. Hasil dari *modal analysis* pada *sandwich panel* untuk jenis *core material A* dan *core material D* seperti pada Tabel 2 pada kondisi utuh dan kondisi cacat untuk *mode* 1 dan *mode* 2

TABEL 2
HASIL MODAL ANALYSIS PADA SANDWICH PANEL

Dimensi Material	Frekuensi Natural (Hz)				Perubahan Frekuensi Natural (persen)	
	Utuh		Cacat			
	mode 1	mode 2	mode 1	mode 2	mode 1	mode 2
Core Material A	2188	2970	2174	2961	-0.64	-0.30
Core Material D	2052	2803	2035	2792	-0.84	-0.39
				Rata Rata	-0.74	-0.35

Tabel 2 menunjukkan adanya perbedaan frekuensi antara kedua jenis *core material*, dengan ketebalan *faceplate* dan *core* yang sama memiliki perbedaan nilai frekuensi yang berbeda. *core material A* memiliki frekuensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan *core material D*, hasil ini dipengaruhi oleh komposisi talac yang digunakan pada bahan *core* sehingga membuat kekakuan yang berbeda antara kedua jenis material tersebut.

Dengan ketebalan *faceplate* dan *core material* kondisi *core* kondisi utuh dengan kondisi rusak memiliki tren frekuensi natural berbeda dengan nilai rata-rata penurunan prosentase 0,74 persen pada *mode* 1 dan 0,35 persen pada *mode* 2. Turunnya nilai frekuensi natural dipengaruhi oleh kekakuan material akibat rusak atau cacat sehingga mempengaruhi kekakuan dari material itu sendiri.

C. Nilai Koherensi Sandwich Panel Pada Kondisi Utuh dan Cacat

Pada dasarnya penentuan nilai koherensi pada sebuah benda uji dipengaruhi oleh *noise* yang muncul saat proses *input* ataupun *output*. Pada saat frekuensi telah mendekati nilai resonansinya, maka respon getaran menjadi dominan sehingga akan mengabaikan *noise* yang terdapat disekitarnya. Dengan begitu untuk mengukur keakuratan data perlu dilakukan perhitungan kembali keandalan data yang diambil dari penelitian ini. Ilustrasi model percobaan menjelaskan bahwa frekuensi pribadi diubah dari satuan waktu menjadi satuan moda frekuensinya dengan perhitungan *Fourier Transform* guna mendapatkan nilai koherensi yang baik [12].

Penentuan *Modal Analysis* diperlukan analisa nilai koherensi untuk mengetahui kualitas dan kuantitas data yang diperoleh dari hasil pengujian. Pada penjelasan sebelumnya telah dijelaskan bawasannya nilai koherensi memiliki skala 0 hingga 1. Dimana nilai 1 pada grafik koherensi melambangkan data hasil pengujian antara data input dan output semakin linier atau sama. Sedangkan nilai koherensi yang mendekati angka 0 menyatakan bahwa banyak *noise* yang terdeteksi pada saat melakukan pengujian atau pengolahan data yang kurang tepat [13]. Nilai koherensi yang didapat pada Tabel 3 diolah menggunakan formula berikut ini

$$\gamma_{FX}^2(\omega) = \frac{|S_{FX}(\omega)|^2}{S_{FF}(\omega)S_{XX}(\omega)} \quad (2)$$

γ = nilai koherensi

$S_{FX}(\omega)$ = *cross spectrum* dari eksitasi dan respon

$S_{FF}(\omega)$ = *auto spectrum* dari eksitasi

TABEL 3
NILAI KOHERENSI SANDWICH PANEL KONDISI UTUH DAN CACAT

Core Material	Koherensi				Rata-rata
	Utuh		Cacat		
	<i>mode 1</i>	<i>mode 2</i>	<i>mode 1</i>	<i>mode 2</i>	
Core Material A-1	0,90	0,89	0,90	0,93	0,90
Core Material A-2	0,91	0,88	0,90	0,92	0,90
Core Material D-1	0,90	0,88	0,91	0,91	0,90
Core Material D-2	0,91	0,93	0,92	0,90	0,92

Dengan hasil secara keseluruhan mendekati nilai 1, ini menunjukkan keseluruhan data yang diambil dan diolah sudah relevan dan mampu digunakan dalam proses analisa. Serta tidak perlu dilakukan pengambilan data maupun pengolahan data ulang.

D. Hasil dan Analisa Damping Ratio

Prinsip dasar getaran suatu benda adalah akan berusaha kembali pada titik keseimbangannya. Sehingga secara perlahan benda tersebut akan mengurangi amplitudonya hingga jarak atau *displacement* benda tersebut memiliki nilai nol. Di dalam konsekuensi redaman, terdapat nilai atau faktor yang dinamakan *damping ratio* dimana parameter yang tidak memiliki dimensi sebagai perbandingan antara *damping* yang terjadi dengan *critical damping* yang terjadi pada benda tersebut [14]. Sehingga persamaan *damping ratio* dapat dituliskan se

Benda yang mengalami getaran lama kelamaan akan berusaha kembali ke titik keseimbangannya. Secara perlahan benda akan berkurang amplitudonya hingga *displacement* benda tersebut menjadi nol. Hal yang mempengaruhi pengurangan *displacement* ini adalah redaman. Di dalam redaman, terdapat hal yang dinamakan *damping ratio*. *Damping ratio* adalah parameter yang tidak memiliki dimensi sebagai perbandingan antara *damping* yang terjadi dan *critical damping* yang diharapkan pada benda tersebut. Jadi *damping ratio* dapat dituliskan sebagai

Karakteristik dinamis lainnya yang perlu diidentifikasi pada pengujian ini adalah *damping ratio*. Yaitu kemampuan material dalam meredam suatu getaran. Identifikasi ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan material dengan perbedaan komposisi pada *core* mampu meredam suatu getaran. Pengolahan data menggunakan metode estimasi dengan formula

$$\zeta_r = \frac{C}{C_c} \quad (3)$$

$$\zeta_r = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2\omega_r}$$

ζ_r = *damping ratio*

C/C_c = *actual damping / damping crisis*

ω_r = *estimasi frekuensi natural pada mode ke-r*

Berikut nilai *damping ratio* dari material sandwich panel pada kondisi utuh ditunjukkan pada Tabel 4.

TABEL 4
HASIL *DAMPING RATIO* KONDISI UTUH DAN CACAT

Jenis Material	Kondisi Utuh		Kondisi Cacat
	(persen)	Rata-rata	(persen)	Rata-rata
Core Material A-1	0.606	0.727	0.769	0.770
	0.790		0.837	
	0.785		0.705	
Core Material A-2	0.579	0.733	0.850	0.785
	0.960		0.865	
	0.661		0.641	
Core Material D-1	0.723	0.768	0.850	0.808
	0.745		0.842	
	0.834		0.732	
Core Material D-2	0.601	0.792	0.694	0.825
	0.522		0.771	
	1.251		1.011	

Tren nilai ratio setiap jenis core material kondisinya sama antara utuh dan cacat yaitu pada core material D memiliki redaman terhadap getarannya lebih baik. Jadi, dapat diambil kesimpulan bahwa damping ratio pada dasarnya tidak merubah nilai frekuensi natural, sementara itu ketebalan core dan faceplate yang sama tidak memiliki perubahan signifikan pada nilai ratio redaman. Tetapi perbedaan angka damping ratio terjadi akibat perbedaan komposisi yang mempengaruhi kekakuan pada material sandwich panel.

Berdasarkan hasil analisa terhadap damping ratio pada Sandwich Panel menunjukkan perbedaan komposisi core mengalami penurunan nilai damping ratio -5,89 persen. Sedangkan nilai damping ratio untuk material Sandwich Panel utuh dengan cacat mengalami peningkatan 5,36 persen pada nilai rata-ratanya.

E. Perbandingan Hasil Analisis dan Eksperimen Sandwich Panel Kondisi Utuh

Proses verifikasi hasil merupakan proses membandingkan kedua hasil pengujian antara analisa numerik dengan ekperimental. Hasil ekperimental merupakan variable control dari proses verifikasi ini, karena hasil ekperimental merupakan hasil yang berasal dari keadaan sesungguhnya, bukan keadaan ideal dari hasil analisa pemodelan.

TABEL 5
PERBANDINGAN ANALISA DAN EXPERIMEN PADA SANDWICH PANEL KONDISI UTUH

Core Material	Frekuensi Natural (Hz)				Perbedaan Frekuensi Natural	
	Analisa		Eksperimen			
	mode 1	mode 2	mode 1	mode 2	mode 1 (persen)	mode 2 (persen)
Core Material A-1	2188	2970	2143	2961	-2.12	-0.30
Core Material A-2	2188	2970	2150	2958	-1.76	-0.41
Core Material D-1	2052	2803	2028	2840	-1.17	1.29
Core Material D-2	2052	2803	2033	2833	-0.94	1.05

Tabel 5 menunjukkan angka frekuensi natural yang dihasilkan dari analisa dengan pemodelan numerik dan eksperimental, dimana tren yang dimiliki antara analisa model dan percobaan eksperimen adalah sama. Perbedaan pada setiap jenis core dengan komposisi yang berbeda akan mengalami penurunan frekuensi pada material tersebut. Jadi core material D frekuensi natural yang dimiliki lebih kecil dibandingkan dengan core material A, sama seperti penjelasan sebelumnya perbedaan nilai ini dipengaruhi oleh kekakuan suatu material. Semakin besar nilai modulus elastisitas pada material tersebut maka memiliki frekuensi yang tinggi dibandingkan yang lainnya. Seperti yang digambarkan pada grafik Gambar 7 yang menunjukkan hasil pengujian sandwich panel pada kondisi utuh.

Gambar 7. Grafik hasil eksperimen sandwich panel kondisi utuh

Frekuensi natural yang dihasilkan pada material dengan kondisi utuh terdapat perbedaan nilai antara core material A dengan D, perbedaan yang terjadi sekitar 30 Hz, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya perbedaan ini terjadi dikarenakan kekakuan pada material tersebut. Terjadi tren penurunan nilai frekuensi antara kedua jenis material tersebut. Perbedaan tersebut juga terjadi pada mode 2 yang mengalami perbedaan sekitar 4 persen lebih kecil dibandingkan dengan core material A.

F. Perbandingan Hasil Analisis dan Eksperimen Sandwich Panel Kondisi Cacat

Dalam penentuan perbandingan nilai hasil analisis dengan eksperimen dilakukan sesuai dengan ilustrasi titik eksitasi uji material sesuai dengan Gambar 3, dimana dilakukan tiga titik eksitasi (*hammer*) dan 5 titik *accelerometer*. Hasil pengolahan data pada pengujian getaran pada *Sandwich Panel* kondisi cacat setelah diolah dengan *Fourier Transform* sehingga data yang diperoleh berupa frekuensi domain.

TABEL 6
PERBANDINGAN ANALISA DAN EKSPERIMEN PADA SANDWICH PANEL KONDISI CACAT

Core Material	Frekuensi Natural (Hz)				Perbedaan Frekuensi Natural	
	Analisa		Eksperimen			
	mode 1	mode 2	mode 1	mode 2	mode 1 (persen)	mode 2 (persen)
Core Material A-1	2174	2961	2104	2929	-3.35	-1.08
Core Material A-2	2174	2961	2105	2918	-3.29	-1.47
Core Material D-1	2035	2792	2034	2774	-0.07	-0.65
Core Material D-2	2035	2792	2025	2755	-0.49	-1.35

Tabel 6 menunjukkan angka frekuensi natural yang dihasilkan dari analisa dengan pemodelan numerik dan eksperimental pada kondisi utuh dan cacat, dimana tren yang dimiliki antara analisa model dan percobaan eksperimen adalah sama. Perbedaan pada setiap jenis *core* dengan komposisi yang berbeda akan mengalami penurunan frekuensi pada material tersebut. Jadi *core material* D frekuensi natural yang dimiliki lebih kecil dibandingkan dengan *core material* A.

Gambar 8 frekuensi natural yang dihasilkan pada material dengan kondisi cact terdapat perbedaan nilai antara *core material* A dengan D, perdedaan yang terjadi dengan rata-rata frekuensi natural 25 Hz pada *mode* 1 dan *mode* 2, perbedaan ini dapat terjadi dikarenakan perbedaan komposisi pada *core*. Sedangkan untuk perbedaan frekuensi natural pada komposisi *core* yang sama terjadi dikarenakan proses pengukatan baut pada dudukan yang tidak sama kekuatan pengencangannya karena belum menggunakan torsimeter. Sehingga mendapatkan hasil tren penurunan nilai frekuensi natural antara kedua jenis material terebut.

Gambar 8. Grafik hasil eksperimen *sandwich panel* kondisi cacat

G. Pengaruh Cacat pada Frekuensi Natural Material Sandwich Panel

Identifikasi cacat pada *core Sandwich Panel* yang telah dilakukan melalui pengujian getaran diperoleh bahwa terjadi penurunan frekuensi natural pada material *sandwich panel* utuh dengan kondisi cacatnya, penurunan frekuensi natural terjadi pada setiap *mode* baik pada analisa model dan eksperimen. Sebagai gambaran kondisi sebenarnya adalah hasil eksperimen. Tabel 7 menunjukkan perbedaan prosentase frekuensi natural antara analisa model dengan eksperimen

TABEL 7
VERIVIKASI HASIL PENGUJIAN GETARAN SECARA MODEL NUMERIK DAN EKSPERIMEN

Core Material	Perbedaan Hasil Analisa dan Experimen (persen)				
	Utuh		Cacat		Rata-rata
	mode 1	mode 2	mode 1	mode 2	
Core Material A-1	-2.12	-0.30	-3.35	-1.08	-1.71
Core Material A-2	-1.76	-0.41	-3.29	-1.47	-1.73
Core Material D-1	-1.17	1.29	-0.07	-0.65	-0.15
Core Material D-2	-0.94	1.05	-0.49	-1.35	-0.43
Rata-rata					-1.01

Diperlihatkan pada Tabel 7 nilai verifikasi keseluruhan percobaan yaitu perbedaan hasil eksperimen dan analisa model. Hasil eksperimen menjadi tolak ukur pada proses verifikasi, hal ini dikarenakan pada eksperimen merupakan representasi keadaan sebenarnya. Rata-rata perbedaan hasil penelitian ini secara keseluruhan antara kondisi material *sandwich panel* utuh dan cacat adalah 1,01 persen. Identifikasi kerusakan material dilakukan pada *core material* A dengan komposisi campuran talac 10 persen dan *core material* D dengan campuran talac 40 persen. Gambar 9 menunjukkan grafik kesesuaian antara analisa model dengan metode eksperimen.

Gambar 9. Grafik verifikasi Hasil pengujian sandwich panel

Gambar 9 menggambarkan grafik verifikasi antara analisa model dengan eksperimen. Garis yang lurus berwarna abu-bu adalah garis yang melambangkan perbandingan kesesuaian hasil dengan perbedaan 0 persen. Sumbu x merupakan hasil analisa model dan sumbu y merupakan hasil eksperimental. Titik pertama pada setiap garis melambangkan *mode* 1 dan titik kedua merepresentasikan hasil *mode* 2, apabila hasil yang dilakukan pada pengujian eksperimen dan analisis mempunyai perbedaan yang kecil, garis hasil akan semakin mendekati garis kesesuaian. Begitu pula sebaliknya, jika perbedaan yang terjadi semakin besar, maka garis hasil per dimensi akan semakin menjauh dari garis kesesuaian. Pengaruh terjadinya cacat pada *core Sandwich Panel* dalam eksperimen terjadi penurunan rata-rata frekuensi natural 1,64 persen.

IV. KESIMPULAN

Pengujian getaran yang dilakukan menunjukkan bahwa, pengaruh adanya cacat pada *core Sandwich Panel* terjadi penurunan rata-rata frekuensi natural sebesar 1,64 persen. Proses verifikasi yang dilakukan dengan membandingkan antara hasil eksperimen dan analisa model. Prosentase keseluruhan percobaan sebesar 1.01persen, hal ini membuktikan bahwa hasil eksperimen telah baik dan linier dengan hasil analisa pemodelan.

V. REKOMENDASI

Berdasarkan pemodelan dan hasil pengujian dengan respon getaran pada material *sandwich panel* maka direkomendasikan penggunaan material *sandwich panel* dengan bahan *core* syntheticresin adalah pada jenis kapal penumpang pada geladak kendaraan, kapal niaga dengan aplikasi pengganti pelat alas pada ruang muat, selain itu dapat diaplikasikan pada geladak ruang akomodasi kapal niaga.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Momcilovic, M. Motok, Estimation of ship lightweight reduction by means of application of sandwich plate system, Faculty of Mechanical Engineering, FME Transactions, Bd. 37 (2009) 123- 128.
- [2] K. V. Ramakrishnan, P. S. Kumar, Applications of sandwich plate system for ship structures, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (2016) 83-90.
- [3] Brooking M, Kennedy S. The performance, safety and production benefits of SPS structures for double hull tankers. Proceedings of RIN A Conference on Double Hull Tankers; 2004 Feb 25-26; London, UK.
- [4] Borsellino C, Calabrese L, Valenza A. Experimental and Numerical Evaluation of Sandwich Composite Structures. Compos Sci Technol. 2004;64:1709-1715.
- [5] E. Utomo, A. Zubaydi, "Penggunaan Sandwich panel (Pelat Baja dan Synthetic Resin) Pada Konstruksi Kapal n," ITS, Surabaya, 2016. (Thesis)
- [6] Sujiatanti SH, Zubaydi A, Budipriyanto A. Finite element analysis of ship deck sandwich panel. Appl Mech Mater. 2018;874:134- 139.
- [7] Ismail A, dkk. Vibration-Based Damage Identification For Ship Sandwich Plate Using Finite Element Method. Open Engineering. 2020. 10:744-752
- [8] I. Winahyu, A. Zubaydi, Analisis Kerusakan Material Sandwich Panel Pada Konstruksi Kapal Menggunakan Getaran, ITS, Surabaya, 2017. (Thesis)
- [9] Ismail A, Zubaydi A, Budipriyanto A, Yudiono. Damage identification of the rice husk sandwich structure for ship deck structure. Proceedings of the 3rd International Conference on Marine Technology; 2018 Dec 5-6; Surabaya, Indonesia.
- [10] Jimin, He. Fu, Zhi-Fang, "Modal Analysis," Butterworth Heinemann, Great Britain, 2001.
- [11] W. Iswidodo, A. Zubaydi, A. Budipriyanto, "Experimental Study on Core Materials of Sandwich Panel for Ship Structure," SENTA, 2016. (Conference proceedings)
- [12] Harris, C, 'Harris' Shock and Vibration Handbook 5th edition,' New York, USA, 2002.
- [13] Ke Chen, et al. Application Of Coherence Analysis Study On Identification Of Vehicle Noise Sources. Journal of Vibroengineering, Vol. 20, Issue 7, 2018, p. 2745-2757
- [14] Vamvoudakis-Stefanou KJ, Sakellariou JS, Fassois SD. Vibrationbased damage detection for a population of nominally identical structures: Unsupervised Multiple Model (MM) statistical time series type methods. Mech Syst Signal Pr. 2018;111:149-171.