

Sandwich Material Application in Ship Structure: A Literature Review

Indonesia

^{1,2,3}Marine Production and Material, Politeknik Negeri Madura, Jl. Raya Camplong KM 04, Camplong, Sampang, Jawa Timur, 69281, Indonesia

Email: heni@poltera.ac.id¹, mustain@poltera.ac.id², heniswanti31@gmail.com³

Abstrak

Belakangan ini material sandwich telah dikembangkan dalam beberapa aplikasi kelautan. Penelitian ini menyajikan tinjauan literatur tentang penerapan material sandwich pada struktur kapal. Material sandwich terdiri dari dua lapisan faceplate dan material inti yang diikat dengan adhesive, yang dikembangkan sebagai material ringan untuk struktur kapal. Beberapa studi eksperimental dan numerik telah dibahas mengenai analisis kekuatan struktur sandwich di berbagai bagian kapal. Dijelaskan bahwa struktur sandwich mempunyai performa kekakuan dan kekuatan yang mendekati atau bahkan lebih baik dibandingkan dengan struktur konvensional plat berpenegar. Selain itu juga dibahas rules yang mengatur penerapan material sandwich pada struktur kapal. Peraturan ini memberikan kriteria untuk memastikan bahwa kekuatan struktur sandwich setara dengan struktur konvensional.

Kata kunci: sandwich, kapal, kekuatan, struktur, ringan

Abstract

Recently, sandwich materials have been developed in several marine applications. This study presents a literature review on the application of sandwich materials in ship structures. The sandwich material consists of two layers of faceplates and core material bonded with adhesive, which was developed as a lightweight material for ship structure. Several experimental and numerical studies have been discussed on the strength analysis of sandwich structures in various ship sections. It is explained that the sandwich structure has stiffness and strength performance that is close to or even better than the conventional stiffened plate structure. Besides that, the rules governing the application of sandwich materials to ship structures are also discussed. This regulation provides criteria to ensure that the strength of sandwich structures is equal to conventional structures.

Keywords: sandwich, ship, strenght, structure, lightweight

Heni Siswanti^{1*1}, M. Musta'in² dan Arisessy M. Mulananda³

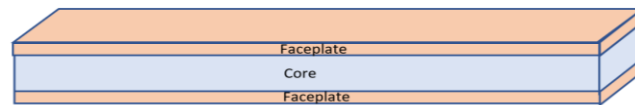
^{1,2,3}Program Studi Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Negeri Madura, Sampang, 69281

1. Pendahuluan

Salah satu inovasi dalam bidang kelautan adalah penggunaan *lightweight material* yang kuat, ringan, mudah dalam proses fabrikasi dan menyederhanakan bentuk struktur dengan penggunaan material sandwich. Material sandwich terdiri dari dua lapisan muka (*facesheets/faceplates*) yang diikat dengan lapisan *core* ditengahnya. Ilustrasi plat sandwich dapat ditunjukkan pada gambar 1. Material sandwich awalnya digunakan pada aplikasi struktur *aeronautic* (Dayyani, et al., 2015; Castani'e, et al., 2020), jembatan (Mahajan & Parekar, 2018), dan lapisan tahan benturan pada struktur. Kemudian meluas digunakan pada struktur bangunan laut sebagai lapisan penahan benturan pada struktur *offshore*. Dalam perkembangannya material sandwich kemudian mendapatkan persetujuan dari *ship classification* untuk digunakan pada struktur kapal (Ramakrishnan & Kumar, 2016). Material sandwich dikembangkan secara luas untuk aplikasi *engineering* sebagai *lightweight material*. *Faceplates/facesheets* yang dipisahkan oleh material *core* yang tebal akan meningkatkan momen inersia penampang, sehingga *bending stiffness* dan *flexural strength* plat akan meningkat secara signifikan. Meskipun demikian berat struktur tidak mengalami kenaikan yang berarti, disebabkan oleh penggunaan material *core*

^{1*} Heni Siswanti

yang memiliki densitas rendah. SANCORe menyebut fenomena ini sebagai “*sandwich effect*” sebagaimana diilustrasikan pada gambar 2 (SANDCORe, 2013).



Gambar 1. Plat Sandwich (SANDCORe, 2013)

	Solid Material	Core Thickness T	Core Thickness $3T$
Stiffness	1.0	7.0	37.0
Flexural Strength	1.0	3.5	9.2
Weight	1.0	1.03	1.06

Gambar 2. Ilustrasi “*sandwich effect*” (SANDCORe, 2013)

Core yang tebal meningkatkan section modulus dari material sandwich, sehingga memberikan kekakuan (*stiffness*) dan kekuatan (*strength*) tambahan. Core ini mendistribusikan beban dan tekanan, sehingga material sandwich lebih tahan terhadap gaya geser dan tekanan (Stewart, 2009). Pada aplikasi bidang kelautan plat sandwich dikembangkan untuk material kapal karena diklaim mampu menurunkan berat konstruksi 4-9%, dibandingkan konstruksi konvensional plat berpenegar (Momcilovic & Motok, 2009; Sujiatanti, et al., 2018; Andric, et al., 2019; Ismail, et al., 2021; Tuswan, et al., 2019). Penurunan berat konstruksi ini dapat meningkatkan berat muatan (*payload*) pada kapal (Momcilovic & Motok, 2009; Brooking & Kennedy, 2004). Selain ringan penggunaan plat sandwich pada struktur menunjukkan nilai rasio kekakuan terhadap berat yang tinggi (Borsellino, et al., 2004; Yang, et al., 2016). Keunggulan lain dari penggunaan struktur sandwich pada kapal adalah dapat mengurangi penggunaan *secondary stiffener*. Dengan penggunaan plat sandwich maka jumlah *secondary stiffener* dapat dikurangi, sehingga titik perpotongan antar komponen konstruksi yang merupakan titik dengan konsentrasi tegangan juga berkurang (Niklas & Kozak, 2016).

Selain penurunan berat, penggunaan plat sandwich pada struktur kapal juga menunjukkan penurunan nilai tegangan (*stress*). Analisis tegangan menggunakan *Finite Element Analysis* (FEA) pada struktur *side shell* kapal tanker yang menggunakan plat sandwich menunjukkan penurunan tegangan hingga 27,02%, jika dibandingkan dengan konstruksi konvensional (Tuswan, et al., 2019; Ismail, et al., 2020). Penurunan nilai tegangan juga ditunjukkan pada aplikasi sandwich pada beberapa bagian konstruksi lain seperti pada *main deck* (Sujiatanti, et al., 2018; Ismail, et al., 2020), *car deck* (Tuswan, et al., 2018) dan *ramp door* (Tuswan, et al., 2021). Nilai tegangan dari struktur sandwich juga berada dibawah tegangan izin (Ramakrishnan & Kumar, 2016). Demikian juga deformasi struktur sandwich pada beberapa bagian juga mengalami penurunan. Secara umum dapat dikatakan bahwa penggunaan material sandwich pada struktur kapal dapat meningkatkan kekakuan lentur yang tinggi terhadap rasio berat (Ardhyananta, et al., 2019) dan juga peningkatan kekuatan terhadap rasio berat hingga 20,75% (Tuswan, et al., 2021).

2. Jenis Material Sandwich

Material sandwich digunakan pada bangunan baru maupun reparasi kapal dan fasilitas offshore. Jenis material sandwich untuk aplikasi bangunan laut adalah sebagai berikut:

2.1 Composite sandwich

Struktur sandwich komposit biasanya terdiri dari bagian skin dari FRP dan material core yang ringan seperti polurethane foam, honeycomb dan balsa (Gupta, et al., 2018). Beberapa keuntungan penggunaan sandwich komposit pada bangunan kapal adalah fatigue strength yang lebih baik, tahan korosi dan memiliki sifat redaman (*damping*). Selain itu teknik produksinya juga dapat dilakukan dengan berbagai macam metode yaitu *hand lay up*, *transfer molding*, *vacuum infusion* dan lain-lain (SANDCORe, 2013). Sehingga memungkinkan penggunaan yang luas pada produksi kapal kecil maupun kapal besar. Beberapa contoh project pembangunan kapal yang menggunakan material sandwich komposit adalah 72 m long visby class corvette (Zenkert, et al., 2005), BESST

(Evegren, et al., 2016), dan FIBRESHIP (Juradoa, et al., 2020). Hal yang masih menjadi masalah dan terus dikembangkan penelitiannya adalah bagaimana menghasilkan sambungan/joint yang terbaik dari lambung kapal yang terbuat dari metal dengan struktur bangunan atas yang terbuat dari sandwich komposit. Perkembangan terkini yang dianggap sebagai penemuan yang muthakhir adalah model hybrid joint antara CFRP lattice sandwich, dengan pyramidal unit cell, dan panel baja (Zhang, et al., 2017). Hingga saat ini masih terus dilakukan penelitian terkait penguatan bekas material sandwich komposit yang tidak terpakai sehingga tidak berdampak buruk pada lingkungan.

2.2 Hybrid sandwich

Hybrid sandwich menggabungkan material metal dan nonmetal untuk memanfaatkan keunggulan kedua material tersebut. Struktur *hybrid sandwich* yang memenuhi syarat untuk bangunan laut adalah jenis sandwich *steel-concrete-steel* (SCS) (Grafton & Weitzenboeck, 2011; Niklas & Kozak, 2016). Metal digunakan sebagai lapisan luar (*faceplates*) dan material concrete sebagai *core*. Kombinasi material ini memberikan efek penurunan berat struktur serta peningkatan kekakuan (*stiffness*) dan kekuatan (Grafton & Weitzenboeck, 2011). Jenis metal yang umum digunakan adalah baja atau aluminium, sedangkan untuk *core* material sangat bervariasi dari mulai *polyurethane elastomer*, resin sintesis, *honeycomb* maupun jenis *foam filling* (SANDCORE, 2013; Palomba, et al., 2021). Beberapa penelitian telah dilakukan dengan simulasi numerik penggunaan struktur hybrid sandwich menggantikan struktur baja konvensional (*plat berpenegar/stiffened plate*) pada bagian tertentu kapal menunjukkan beberapa keuntungan dari sisi kekuatan dan kekakuan seperti penurunan stress dan deformasi (Utomo, et al., 2016; Sujiatanti, et al., 2018; Tuswan, et al., 2019; Brooking & Kennedy, 2004; Ramakrishnan & Kumar, 2016). Selain itu juga memberikan efek penurunan berat struktur dan menyederhanakan bentuk struktur, serta memberikan keuntungan dari sisi proses produksi yaitu mengurangi pekerjaan welding antara plat dan stiffener (Grafton & Weitzenboeck, 2011).

2.3 All metal sandwich.

All metal sandwich menggunakan *faceplates* dan *core* material berupa material logam. Material yang digunakan biasanya adalah baja atau aluminium alloy (Palomba, et al., 2021). Wacana penggunaan steel-sandwich pada beberapa aplikasi engineering telah dimulai sejak tahun 1950an, akan tetapi penggunaannya masih belum berkembang karena beberapa keterbatasan, contohnya adalah kesulitan dalam penyambungan. Pada tahun 80an dan 90an karakteristik dari *adhesively bonded steel-sandwich* mulai dipelajari dan dikembangkan, dilanjutkan dengan investigasi aplikasi dan produksi steel-sandwich untuk cruise vessel (E.M. Knox, et al., 1998). Pada sandwich jenis ini antara *faceplate* dengan *core* dihubungkan dengan pengelasan misalnya *laser welding* dan *friction stir welding* (Mueller & Volpone, 2009). Selain itu dapat juga memanfaatkan sambungan mekanis seperti paku keeling dan ikatan perekat (SANDCORE, 2013). Struktur all metal sandwich menjamin tingkat akurasi yang tinggi, karena dapat diproduksi di workshop dengan lingkungan yang terkendali sebelum diassembly di galangan kapal. Hal ini dapat membantu peningkatan kualitas, pengurangan waktu kerja di galangan kapal dan pengurangan biaya produksi. Evaluasi awal mengenai penerapan panel sandwich baja untuk bangunan atas, menyatakan bahwa penghematan berat struktural hanya signifikan untuk kapal besar, tetapi biaya produksi, waktu pembangunan dan waktu pengerjaan diperkirakan dapat dikurangi hingga 50% (Kortenoeven, et al., 2008). Salah satu perhatian untuk struktur *all metal sandwich* berkaitan dengan proses produksinya dan kemungkinan untuk menggabungkan metal yang berbeda, baik di dalam struktur sandwich itu sendiri maupun dengan elemen kapal lainnya (Mueller & Volpone, 2009).

2.4 Penggunaan lain dari material sandwich untuk kapal dan marine structure

Selain ketiga kategori aplikasi sandwich diatas, ada alternatif lain penggunaan sandwich pada struktur bangunan laut yaitu *rubber sandwich coating* pada lambung kapal. Aplikasi ini dikembangkan oleh (Chen, et al., 2009) dimana *rubber sandwich coating* digunakan sebagai pelapis lambung kapal untuk mengurangi/memitigasi efek dari *underwater explosion* (ledakan bawah air). Lapisan coating ini terdiri dari permukaan rubber dengan *rubber honeycomb core* yang dicetak kemudian ditempelkan dengan perekat pada bagian luar lambung kapal. Lapisan rubber ini menjadi *external facesheet* dan lambung kapal menjadi *internal facesheet* dengan *core rubber honeycomb*. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa rubber sandwich coating mampu mengurangi kemungkinan kerusakan karena shock waves akan tetapi masih perlu optimasi untuk meningkatkan proteksi dari whipping damages karena bubble pulse. Aplikasi ini sekilas mirip dengan “*no hot work overlay*” yang dikembangkan oleh (Kennedy, et al., 2003) akan tetapi berbeda material yang digunakan. *Overlay* yang dikembangkan Kennedy

menggunakan lapisan steel sama dengan material lambung kapal yang dilapisi, sedangkan Chen menggunakan lapisan rubber sebagai eksternal facesheet.

Selain type *steell-concrete-steell* penggunaan sandwich material type *steel-concrete-polymer* juga termasuk kategori hybrid sandwich. Material ini digunakan untuk struktur di tangki kapal sebagai *crashworthy barrier* sebagai antisipasi kejadian kandas (*grounding*) dan tubrukan (*collision*). Desain mereka terdiri dari sandwich yang dibuat dengan plat baja yang sebagai lapisan luar kapal, core material dan *hyperelastic polyurethane layer* sebagai lapisan dalam (*bottom laminate*) (Niklas & Kozak, 2016). Lapisan *hyperelastic polyurethane* ini selain memberikan fungsi kekuatan struktur juga berfungsi sebagai lapisan kedap yang mencegah tumpahan minyak jika terjadi kerusakan pada struktur sandwich kulit kapal ini. Penggunaan hybrid sandwich jenis ini lebih diutamakan pada bagian *bottom* dan *side sheell* pada oil tank atau pada bagian lain dimana kekedapan menjadi hal yang krusial (Niklas & Kozak, 2016). Struktur hybrid sandwich juga menjadi kandidat ideal untuk tujuan insulasi pada kapal tertentu yang membutuhkan *advanced insulation* seperti pada LNG carrier yang bersifat *cryogenic* (temperatur sangat rendah) (Kortenoeven, et al., 2008).

Secara komersial saat ini penggunaan struktur sandwich untuk beberapa aplikasi engineering telah dilakukan oleh satu perusahaan dari Inggris yang bernama SPS Technology. Produk sandwich yang dikomersialkan berupa jenis steel-based sandwich yang diberi nama dagang Sandwich Plate System (SPS). Selain untuk bangunan laut aplikasi SPS juga meliputi struktur jembatan, aeronautical dan bangunan sipil. Berikut adalah beberapa contoh proyek pembangunan dan reparasi kapal yang menggunakan aplikasi sandwich yang ditangani oleh perusahaan ini:

- a. Reparasi FPSO ESPOIR IVOIRIEN tahun 2022, dilaksanakan di Pantai Gading (Ivory Coast), posisi struktur yang menggunakan aplikasi sandwich adalah area *main deck*, *cargo oil tanks*, *forward void space*, *side shell* dan *bottom*.
- b. Reparasi *offshore support vessel* (OSV) dengan pemasangan “*overlay*” sandwich pada working deck. Plat sandwich ini berfungsi sebagai penahan dampak (*impact resistance*) pada area deck saat operasi penurunan jangkar maupun pekerjaan lain.
- c. Reparasi RSV AURORA AUSTRALIS di Sembawang Shipyard, pada tahun 2013. Aplikasi sandwich digunakan untuk memperbaiki beberapa bagian struktur plat sekat antara wing ballast tank dengan FO tanks. Retak pada struktur ini telah berulang terjadi meskipun telah direparasi dengan menggunakan struktur konvensional. Akhirnya retak berulang dapat teratasi dengan aplikasi overlay sandwich pada daerah tersebut.
- d. Reparasi tiga buah kapal tanker milik NDA untuk area HFO & MGO *fuel tanks*, yang dilaksanakan di galangan kapal di Qatar pada tahun 2015. Aplikasi sandwich digunakan untuk insulasi termal pada tangki bahan bakar (HFO & MGO).
- e. Reparasi FPSO GLEN LYON EOR di galangan kapal Ulsan, Korea Selatan pada tahun 2013. Aplikasi sandwich digunakan sebagai insulasi termal antar tangki pada FPSO ini, untuk mempertahankan temperatur *storage tank*.
- f. Pembangunan Car Carrier di galangan kapal Uljanik, Croatia pada tahun 2019, yaitu dengan menggunakan *grillage sandwich* pada tiga deck teratas dari kapal tersebut, sehingga menurunkan berat struktur mencapai 240 ton daripada kapal sebelumnya yang dibangun tanpa aplikasi sandwich. (Andric, et al., 2019)

3. Pengembangan Core Material Sandwich

Penelitian terhadap kemungkinan penggunaan material lain untuk jenis *steel-based hybrid sandwich* dilakukan untuk mendapatkan alternatif material lain yang memenuhi kriteria untuk digunakan sebagai *core* material. Salah satu jenis material yang telah diteliti di antaranya adalah resin sintesis berupa *Unsaturated Polyester Resin* (UPR), baik resin murni atau dengan tambahan material lain. Kombinasi resin sintesis dengan *talc* dengan komposisi tertentu telah memenuhi kriteria kekuatan, akan tetapi perlu tetap memiliki sifat getas (*brittle*) yang harus diperbaiki (Utomo, et al., 2016; Zubaydi, et al., 2018). Masih dengan material yang sama yaitu kombinasi resin sintesis, *talc* dan diberikan tambahan 30% *clamshell powder* mampu menaikkan densitas dan *tensile strength* dari material *core* (Abdullah, et al., 2017).

Material lain berbasis bio-resin dengan memanfaatkan minyak organik dengan kadar tertentu menghasilkan performa yang lebih baik. Eksperimen menunjukkan bahwa material ini memenuhi seluruh kriteria *core* material baik *tensile strength*, densitas, *elongation break* maupun *hardness*-nya. *Palm oil* dan *sesame oil* yang ditambahkan memberikan pengaruh kenaikan *elongation* pada material (Ardhyanta, et al., 2019; Tuswan, et al., 2021; Tuswan, et al., 2022). Polyurethane elastomer core yang telah digunakan sebelumnya cukup mahal dan tidak ditemui di Indonesia,

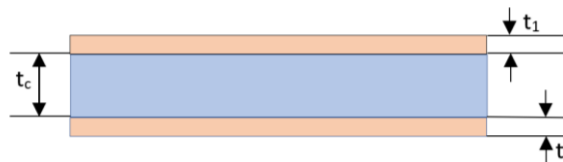
sehingga kurang efektif untuk digunakan pada galangan kapal skala kecil di Indonesia. Baru-baru ini dikembangkan jenis *core polyurethane elastomer* (PU) yang lebih murah dan telah memenuhi standar densitas, *hardness*, kekuatan tarik dan kriteria modulus elastisitas yang ditetapkan oleh kelas LR (Ismail, et al., 2023).

4. Rules untuk aplikasi sandwich pada struktur kapal

Struktur kapal niaga diatur oleh klasifikasi untuk menjamin standart keselamatan dan kualitas kapal. Material, konfigurasi komponen-komponen struktur dan kekuatan struktur diatur secara ketat oleh regulasi atau aturan klas. Begitu juga yang terjadi pada material sandwich untuk aplikasi bangunan laut. Aturan khusus untuk material sandwich telah dikembangkan oleh beberapa Biro Klasifikasi, untuk memastikan kekuatan struktur sandwich setara dengan kekuatan struktur konvensional. Aturan yang ditetapkan oleh klas biasanya mencakup 3 hal, yaitu bahan penyusun material sandwich, panel sandwich dan keseluruhan struktur sandwich (Palomba, et al., 2021). Berikut adalah Klasifikasi yang telah mengembangkan aturan khusus untuk material sandwich:

4.1 Lloyd's Register (LR)

LR adalah salah satu dari Classification yang paling awal membuat aturan khusus untuk material sandwich. LR telah menentukan aturan untuk *core material* maupun material skin dari metal base (*steel* dan *aluminium*) (Lloyd's-Register., 2020; Lloyd's-Register, 2021) dan komposit (Lloyd's Register, 2011). Core material yang diatur meliputi golongan elastomer dan *foam*. Berdasarkan aturan LR plat sandwich terdiri dari 3 bagian, yaitu *faceplate* bagian atas/*top plate*, *faceplate* bagian bawah/*bottom plate*, dan *core*. Tebal masing-masing bagian plat sandwich tersebut dinyatakan dengan dengan t_1 , t_2 , dan t_c . Konfigurasi tebal plat sandwich ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Konfigurasi plat sandwich (Lloyd's-Register, 2021)

Berdasarkan aturan ini tebal masing-masing bagian *faceplate* dan *core* ditentukan berdasarkan nilai *strength index* (R). Nilai R untuk konstruksi baru adalah kurang dari atau sama dengan 1 ($R \leq 1$). Nilai *strength index* juga dipengaruhi oleh ukuran panjang dan lebar panel plat sandwich yang akan didesain. Tebal masing-masing plat sandwich juga ditentukan oleh lokasi plat tersebut pada bagian konstruksi kapal, dimana nilai variabel *thickness allowance* t_{aR} , t_{a1} dan t_{a2} untuk perhitungan nilai R dalam perhitungan tebal plat sandwich berbeda-beda tergantung lokasi struktur. Nilai *thickness allowance* berdasarkan lokasi struktur

4.2 DNV-GL

Klasifikasi berikutnya yang telah mengembangkan aturan khusus untuk material sandwich adalah DNV-GL. Sebagaimana LR kelas ini juga mengatur tentang requirement untuk material skin baik metal based (DNV-GL, 2016; DNV-GL., 2019) maupun komposit. Demikian juga core material serupa dengan klas sebelumnya golongan elastomer dan foam (Polyurethane foam, PVC foam, balsa, dll) juga diatur. Elastomer ini umumnya digunakan untuk sandwich struktur dari metal based, sedangkan golongan foam digunakan untuk sandwich struktur dari composite laminate.

4.3 RINA

Classification ini mengembangkan aturan untuk requirement material dan struktur sandwich komposit serta sedikit aturan untuk metal based sandwich (RINA, 2007).

4.4 BV

Sebagaimana RINA, BV hanya mengembangkan aturan untuk material dan struktur sandwich laminasi komposit (BV, 2018).

Menurut (Palomba, et al., 2021) secara umum hal yang diatur dalam Rules dan Standart untuk sandwich pada aplikasi bangunan laut adalah sebagai berikut:

1. Karakteristik mekanik dan sertifikasi material, baik *skin/facesheet* atau *core*
2. Persyaratan minimum dan standar uji dari material *skin/facesheet* dan *core*

3. Persyaratan minimum tebal (*thickness*) dari skin/facesheet dan core yang tergantung dari posisi dimana material tersebut digunakan dalam struktur kapal (*deck, hull, bottom, superstructure, dll*)
4. Kriteria desain, termasuk desain fabrikasi seperti metode ‘*overlay*’ maupun metode yang lain.
5. Kriteria kekuatan struktur seperti *buckling*.

Selain daripada itu Klasifikasi juga masih mensyaratkan beberapa pengujian terhadap material sandwich sebelum disetujui untuk diaplikasikan, yaitu mengenai:

1. Kekuatan rekat antara *core* material dengan *skin laminate/facesheet*
2. Penyambungan antara material sandwich dengan material lain ketika diaplikasikan pada salah satu bagian kapal. Misalnya tiang *mast* dengan *deck*, dll.
3. *Fatigue analysis*/analisis kegagalan untuk beberapa bagian kritis.

Selain itu penggunaan sandwich terutama yang berasal dari material komposit yang memiliki sifat dapat terbakar harus memperhatikan aturan *fire safety* dari SOLAS.

5. Tantangan dan Risiko Aplikasi Struktur Sandwich

Aplikasi sandwich pada struktur kapal merupakan teknologi yang relatif baru, akan tetapi dengan beberapa keunggulan tersebut maka teknologi ini sangat potensial untuk dikembangkan untuk struktur kapal besar. Plat sandwich yang digunakan pada kapal dengan ukuran umumnya adalah jenis *hybrid sandwich* yang terdiri dari *faceplate* dari material baja dan *core* material matriks polyurethane elastomer. Material baja sebagai *faceplates* dan matriks *polyurethane* sebagai *core* pada *steel-based hybrid sandwich* memiliki karakteristik material yang berbeda.

Efek penurunan berat struktur sandwich selain disebabkan oleh pengurangan jumlah *stiffener*, juga karena kecenderungan penggunaan *faceplates* yang lebih tipis (Grafton & WeitzenboEck, 2011). Kombinasi ini menghasilkan rasio kekuatan dan berat yang optimum, akan tetapi sensitivitas terhadap kerusakan akan meningkat (Commite, 2000; Palomba, et al., 2021). Artinya jika terjadi kerusakan pada komponen struktur sandwich maka integritas struktur seperti kekuatan dan kekakuan akan menurun secara drastis. Perbedaan karakteristik material antara *faceplate* dan *core* juga dapat meningkatkan kerentanan terhadap kerusakan, terutama pada aplikasi material sandwich pada struktur yang kompleks (Palomba, et al., 2021).

Kerusakan pada plat sandwich dapat terjadi baik pada bagian *faceplate* maupun *core*. Beberapa kerusakan *faceplate* yang mungkin terjadi diantaranya adalah *face yielding, indentation, face wrinkling* dan *face fracture* (Palomba, et al., 2021). Sedangkan kerusakan pada *core* diantara adalah *core shear* (Palomba, et al., 2021), *core crushing* (Castanié, et al., 2020) dan juga *ununiform* berupa *voids/inclusions* (Zenkert, 2009). Penyebab terjadinya kerusakan pada material sandwich diantaranya adalah cacat produksi (*manufacturing flaws*) akibat ketidak sempurnaan pada saat proses produksi, atau dapat juga disebabkan kerusakan saat operasional (*in-service damaged*) akibat beban kerja pada struktur sandwich tersebut (Zenkert, 2009). Meskipun kerusakan jenis ini tidak langsung menyebabkan kehilangan kekedapan struktur kapal, akan tetapi dalam jangka panjang keberadaan cacat *face/core debonding* yang berpropagasi dapat menjadi mode kegagalan kritis yang membahayakan integritas struktur. Karena kondisi kerusakan ini dapat menyebabkan penurunan kekuatan (*strength*) (Mohanan, et al., 2013), kekakuan (*stiffness*) (Kishore, et al., 2020) dan daya dukung beban (*load carrying capacity*) dari struktur (Bragagnolo, et al., 2020). Apalagi kerusakan pada bagian *core* tidak mudah terlihat meskipun dilakukan inspeksi visual.

Oleh karena itu sebagai upaya optimasi desain struktur sandwich, agar dapat diaplikasikan dan dikembangkan untuk struktur kapal yang lebih luas, perlu dipelajari bagaimana karakteristik perilaku kerusakan pada pada plat sandwich. Pemahaman tentang perilaku kerusakan struktur ini menjadi penting untuk dipelajari dan dikembangkan. Sehingga dapat mencegah kerusakan fatal pada struktur, menemukan waktu dan metode yang tepat untuk perbaikan atau reparasi struktur serta pada akhirnya untuk dapat mengembangkan model desain yang sederhana (*simplified model design*) untuk struktur *steel-based hybrid sandwich* dengan *core* jenis matriks *polyurethane*.

6. Kesimpulan

Material sandwich terdiri dari dua lapisan *faceplate* dan material inti yang diikat dengan adhesive, yang dikembangkan sebagai material ringan untuk struktur kapal. Beberapa studi menjelaskan bahwa struktur sandwich mempunyai performa kekakuan (*stiffness*) dan kekuatan (*strength*) yang lebih baik dibandingkan dengan struktur konvensional. Selain itu penggunaan material sandwich dapat menurunkan berat struktur bangunan laut, serta dapat menyederhanakan konfigurasi struktur. Selain itu juga dibahas rules yang mengatur penerapan material sandwich pada struktur kapal. Material ini dapat digunakan untuk bangunan baru maupun untuk perbaikan struktur dengan metode

overlay. Secara umum penggunaan material sandwich pada kapal dan bangunan laut lain diatur oleh Rules dari Biro Klasifikasi untuk memastikan bahwa kekuatan struktur sandwich setara dengan struktur konvensional. Tantangan kedepan untuk aplikasi sandwich pada struktur yang lebih luas adalah bagaimana mendapatkan desain yang optimum, dengan memperhatikan ketahanan material terhadap kerusakan.

7. Ucapan Terima Kasih

Artikel ini merupakan luaran dari hibah penelitian internal Politeknik Negeri Madura, berdasarkan Surat Keputusan nomor 617/PL34/AL.04/2023 dan Perjanjian Kontrak Nomor 882/PL34/AL.04/2023.

8. Daftar Pustaka

- Abdullah, K., Zubaydi, A. & Budipriyanto, A., 2017. *Development of Sandwich Panel with Core from Clamshell Powder for Ship Structure*. Surabaya, SENTA 2017-ITS.
- Andric, J., Kitarovic, S., Radolovic, V. & Prebeg, P., 2019. Structural analysis and design of a car carrier with composite sandwich deck panels. *Ships and Offshore Structures*.
- Ardhyanta, H., Sari, E., Wicaksono, S. & Ismail, H., 2019. *Characterization of Vinyl Ester Bio-resin for Core Material Sandwich Panel Construction of Ship Structure Application: Effect of Palm Oil and Sesame Oil*. s.l., s.n., pp. 1-5.
- Borsellino, C., Calabrese, L. & Valenza, A., 2004. *Experimental and numerical evaluation of sandwich composite structures*. s.l., s.n.
- Bragagnolo, G., Crocombe, A., Ogin, S. & Mohagheghian, I., 2020. Investigation of skin-core debonding in sandwich structures with foam cores. *Materials & Design* 186, pp. 1-10.
- Brooking, M. & Kennedy, S., 2004. *The performance, safety and production benefits of SPS structures for double hull tankers*. London, UK, RINA .
- BV, 2018. *Hull in Composite Materials and Plywood, Material Approval, Design Principles, Construction and Survey*. s.l.:s.n.
- Castanié, B., Bouvet, C. & Ginot, M., 2020 . Review of composite sandwich structure in aeronautic applications. *Compos. Part C Open Access*, vol. 1.
- Castanié, B., Aminanda, Y., Bouvet, C. & Barrau, J., 2020. Core crush criterion to determine the strength of sandwich composite structures subjected to compression after impact.
- Chen, Y., Tong, Z. P., Hua, H. X. & Wang, Y., 2009. Experimental investigation on the dynamic response of scaled ship model with rubber sandwich coatings subjected to under- water explosion. *Int. J. Impact Eng.*, vol. 36, no. 2, p. 318–328.
- Commite, S. S., 2000. *Guide to Damage Tolerance Analysis of Marine Structure*, s.l.: Ship Structure Commite.
- Dayyani, I., Shaw, A., Flores, E. & Friswell, M., 2015. The mechanics of composite corrugated structures: a review with applications in morphing aircraft. *Composite Structures* 133, pp. 358-380.
- DNV-GL., 2019. *Rules For Classification – Ships – Part 2 Materials and welding – Chapter 2 Metallic materials*. s.l.:s.n.
- DNV-GL, 2016. *Steel Sandwich Panel Construction*. s.l.:s.n.
- E.M. Knox, E. M., Cowling, M. J. & Winkle, I. E., 1998. Adhesively bonded steel corrugated core sandwich construction for marine applications. *Marine Structures*, Volume 11, pp. 185-204.
- Evegren, F., Hertzberg, T. & Rahm, M., 2016. *Fire Tests of FRP Composite Ship Structures*, s.l.: SP Technical Research Institute of Sweden.
- Grafton, T. J. & Weitzenboeck, J. R., 2011. *Steel-concrete-steel sandwich structures in ship and offshore engineering*. s.l., s.n., p. 549–558.
- Gupta, N., Zeltmann, S. E., Luong, D. & Doddamani, M., 2018. Core materials for marine sandwich structures. Dalam: *Marine Composites: Design and Performance*. s.l.:Woodhead Publishing, pp. 187-224.

- Ismail, A., Zubaydi, A., Piscesa, B. & Panangian, E., 2020. *A comparative study of conventional and sandwich plate side-shell using finite element method*. s.l., IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol 1034.
- Ismail, A., Zubaydi, A., Piscesa, B. & Panangian, E., 2020. A strenght analysis of conventional and sandwich plate deck using Finite Element Method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol 1034*.
- Ismail, A., Zubaydi, A., Piscesa, B. & Tuswan, 2021. Study of Sandwich Panel Application On Side Hull Of Crude Oil Tanker. *Journal of Applied Engineering Science*.
- Ismail, A., Zubaydi, A., Piscesa, B. & Tuswan, 2023. A novel fiberglass-reinforced polyurethane elastomer as the core sandwich material of the ship-plate system. *Journal of the Mech Behavior of Mat, Volume 32*.
- Juradoa, A., Garciaa, C., Sanchez, E. & Beltran, P., 2020. *FIBRESHIP project: Engineering, production and life cycle management for the complete construction of large length fibre based ships..* Helsinki, Findland, s.n.
- Kennedy, S. J., Bond, J., Braun, D. & G., N. P., 2003. An Innovative “No Hot Work” Approach to Hull Repair in In-Service FPSOs Using Sandwich Plate System Overlay. *Offshore Technology Conference*.
- Kishore, I. S., Chowdary, M. & Rao, V. R., 2020. *Effect of Debonding on Stiffness and Long-term Creep of Sandwich panels*. s.l., IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 993.
- Kortenoeven, J., Boon, B. & De Bruijn, A., 2008 . Application of sandwich panels in design and building of dredging ships. *J. Sh. Prod., vol. 24, no. 3,* p. 125–134.
- Lloyd’s Register, 2011. *Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft..* s.l.:Lloyd’s Register.
- Lloyd’s-Register., 2020. *Rules for the Manufacture Testing and Certification of Materials*. s.l.:Lloyd’s Register,.
- Lloyd’s-Register, 2021. *Rules for the Application of Sandwich Panel Construction to Ship Structure..* s.l.:Lloyd’s Register.
- Mahajan, H. V. & Parekar, S. R., 2018. Sandwich Plate System in Bridge Deck- A Review. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 5(4), pp. 552-554.
- Mohanana, A., Pradeep, K. R. & Narayanan, K. P., 2013. Performance Assessment of Sandwich Structures with Debonds and Dents. *International Journal Of Scientific & Engineering Research* , 4(5), pp. 174-179.
- Momcilovic, N. & Motok, M., 2009. Estimation of ship lightweight reduction by means of application of sandwich plate system. *FME Trans vol. 37, no. 3*, p. 123–128.
- Mueller, S. & Volpone, L. M., 2009 . Friction stir welding of steel/aluminium sandwich panels. *Weld. Int., vol. 23, no. 9,* p. 699–705.
- Niklas, K. & Kozak, J., 2016. Experimental investigation of Steel–Concrete–Polymer composite barrier for the ship internal tank construction. *Ocean Engineering., vol. 111*, p. 449–460.
- Palomba, G., Epasto, G. & Crupi, V., 2021. Lightweight sandwich structures for marine applications: a review. *Mech of Adv Mat and Struct*.
- Ramakrishnan, K. & Kumar, P., 2016. Application of Sandwich Plate System for Ship Structures. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, pp. 83-90.
- RINA, 2007. *Rules for the Classification of Fast Patrol Vessels*. s.l.:s.n.
- SANDCORE, C.-o. A., 2013. *Best Practice Guide for Sandwich Structures in Marine Applications*, New Castle: University of Newcastle upon Tyne.
- Stewart, R., 2009. At the core of lightweight composites. *Reinforced plastics*, April, pp. 30-35.
- Sujatanti, S., Zubaydi, A. & Budipriyanto, A., 2018. Finite element analysis of ship deck sandwich panel. *Applied Mechanics and Materials 874*, pp. 134-139.
- Technology, S., t.thn. s.l.:s.n.

- Tuswan, Abdullah, K., Zubaydi, A. & Budipriyanto, A., 2019. *Finite-element analysis for structural strength assessment of marine sandwich material on ship side-shell structure*. s.l., s.n., p. 109–111.
- Tuswan, T., Sari, E. N., Ismail, A. & Prabowo, A. R., 2022. Experimental Evaluation on Palm Oil and Sesame Oil-based Resin Properties as Core Sandwich Material for Lightweight Ship Structure. *International Journal of Engineering*, 35(9).
- Tuswan, T., Zubaydi, A., Piscesa, B. & Ismail, A., 2021. Influence of Application of Sandwich Panel on Static and Dynamic Behaviour of Ferry Ro-Ro Rampdoor. *JOURNAL OF APPLIED ENGINEERING SCIENCE*, 11(1), pp. 208-216.
- Tuswan, Zubaydi, A., Budipriyanto, A. & Sujiatanti, S., 2018. *Comparative study on ferry ro-ro's car deck structural strength by means of application of sandwich materials*. s.l., s.n., pp. 87-96.
- Tuswan, Zubaydi, A., Piscesa, B. & Sari, E. N., 2021. *Core sandwich material development based on vinyl ester bioresin for ship structure application*. s.l., IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Vol 1034.
- Utomo, E., Zubaydi, A. & Pratisna, P., 2016. *Study of Core Material Sandwich Panel in Ship Construction*. Surabaya, s.n.
- Yang, J., Maa, L., Schmidt, R. & Qi, G., 2016. Hybrid lightweight composite pyramidal truss sandwich panels with high damping and stiffness efficiency. *Composite Structures*, Volume 148, p. 85–96.
- Zenkert, D., 2009. *Damage Tolerance of Naval Sandwich Panels*, Stockholm: Department of Aeronautical and Vehicle Engineering.
- Zenkert, D., Shipsha, A., Bull, P. & Hayman, B., 2005. Damage tolerance assessment of composite sandwich panels with localised damage. *Composites Science and Technology*, Volume 65, p. 2597–2611.
- Zhang, K., Shi, D., Wang, W. & Wang, Q., 2017. Mechanical characterization of hybrid lattice-to-steel joint with pyramidal CFRP truss for marine application. Volume 160.
- Zubaydi, A., Budipriyanto, A., Utomo, E. & Sujiatanti, S. H., 2018. Development of Sandwich Core Material for Deck Structure. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 9(11), p. 2551–2560.