

Analisis Kekuatan Lambung Kapal Bermaterial Komposit Yang Dibuat Menggunakan Metode VARTM

Sunaryo¹, Gatot Prayogo², Sri Lestari Maharani³, Gerry Liston Putra⁴

Program Studi Teknik Perkapalan, Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia
Kampus UI Depok 16424
E-mail: naryo@eng.ui.ac.id

Abstrak

Pembuatan lambung kapal dengan menggunakan material komposit semakin diminati mengingat sifat komposit yang tidak korosif, mudah dibentuk, ringan, dan berkekuatan tinggi. Salah satu metode yang sedang berkembang saat ini yaitu metode laminasi material komposit fiber glass dengan *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding* (VARTM). Kelebihan metode VARTM dibandingkan dengan cara konvensional antara lain adalah diperolehnya ketebalan laminasi yang lebih tipis namun memiliki kekuatan yang lebih tinggi. Tujuan dari penelitian ini ialah untuk mengetahui karakteristik kekuatan struktur kapal jika menggunakan material komposit yang dibuat dengan metode VARTM. Penelitian dilakukan dengan menggunakan rancangan lambung kapal cepat yang sudah ada sebagai acuan pengujian, yaitu kapal dengan ukuran panjang 28 m, lebar 5,4 m, dan tinggi 3,42 m. Metodologi yang dilakukan adalah dengan pendekatan eksperimental dan simulasi dengan menggunakan metode elemen hingga. Laminasi komposit *single skin* VARTM disusun dengan cara menyamakan jumlah fiber konten kompositnya dengan persyaratan yang ditentukan untuk metode *Hand Lay Up*. Lamina disusun secara simetris dan *quasi isotropic* sesuai dengan jumlah lapisan yang disyaratkan. Analisis kekuatan material dilakukan dengan mengasumsikan gaya maksimum yang bekerja ketika kapal sedang dalam kondisi *hogging* dan *sagging*. Pada kondisi *Hogging* tegangan maksimum yang terjadi adalah 159.16 MPa dan tegangan minimum -190.82 Mpa, sedangkan pada kondisi *Sagging* tegangan maksimum yang terjadi 75.493 MPa dan tegangan minimum -63.857 MPa. Setelah melakukan analisis berdasarkan kriteria kegagalan komposit *Tsai Wu* terhadap komposit yang dibentuk didapatkan tidak terjadi kegagalan pada material struktur kapal baik pada kondisi *hogging* maupun *sagging*, dan dari analisis ini juga didapatkan bahwa lapisan *quasi isotropic* memiliki kekuatan material yang lebih baik dibandingkan dengan lapisan simetris, sehingga dapat disimpulkan bahwa lambung kapal cepat bermaterial komposit yang dibuat dengan metode VARTM walaupun memiliki ketebalan yang lebih tipis dibandingkan metode *hand lay up* tetapi memiliki kekuatan yang lebih tinggi, sehingga dapat meningkatkan efisiensi penggunaan material dan lambung kapal yang lebih ringan.

Keywords: kapal cepat, kekuatan, komposit, material, *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding* (VARTM).

Pendahuluan

Fibre reinforced Plastic (FRP) telah digunakan cukup lama untuk pembuatan lambung dan geladak kapal. Salah satu keuntungan dari penggunaan FRP sebagai struktur utama yaitu tidak korosif, ringan dan kuat. Teknologi komposit di bidang perkapalan semakin berkembang seiringnya waktu, sehingga banyak material dan proses manufaktur baru yang ditemukan. Salah satu yang sedang berkembang ialah laminasi material komposit fiber glass dengan metode *Vacuum resin infusion*. Sistem ini memiliki keuntungan dalam penghematan material, peningkatan kekuatan dan lebih ringan. Menurut penelitian Michael Weiner, jika dibandingkan dengan metode *Hand Lay-Up* (HLU),

metode *vacuum infusion* dapat meningkatkan kekuatan hingga 10-30%.

Material FRP banyak digunakan dalam pembuatan kapal cepat, karena pada dasarnya kapal cepat membutuhkan material yang ringan dan kuat agar dapat melaju dengan cepat dan tetap mampu menahan beban dampak atau *slamming* yang terjadi, sehingga badan kalsifikasi kapal juga menmpatkan peraturan material fiber glass pada peraturan kapal cepat.

Di Indonesia, metode *Vacuum resin infusion* masih belum dioptimalkan penerapannya diberbagai galangan kapal yang mengerjakan material komposit karena berbagai factor, salah satunya adalah galangan belum mengetahui secara tepat berapa jumlah lapisan material dan ketebalan yang dibutuhkan untuk

mencapai kekuatan optimum yang diisaratkan oleh Badan Klasifikasi, karena belum adanya peraturan yang spesifik mengenai proses pembuatan, cara menghitung jumlah lapisan, dan kekuatan komposit jika menggunakan proses *Vacuum resin infusion* atau *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding* (VARTM). Galangan hanya merujuk kepada peraturan Badan Klasifikasi mengenai penggunaan komposit dengan metode *Hand lay up* (HLU) ataupun *Spray up* dan mengikuti jumlah lapisan lamina tersebut akan tetapi belum mengetahui nilai kekuatannya. Tujuan dari penelitian ini ialah untuk mengetahui karakteristik kekuatan struktur kapal jika menggunakan material komposit yang dibuat dengan metode VARTM, sehingga galangan bisa mengetahui metode dan penggunaan material yang optimum untuk mencapai nilai kekuatan struktur yang disyaratkan oleh Badan Klasifikasi sesuai dengan dimensi kapal yang akan dibangun.

Material komposit untuk VARTM disusun dengan cara menyamakan jumlah konten fiber penguat dengan yang digunakan pada metode *Hand Lay Up*. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk memprediksi kekuatan memanjang pada kapal berdasarkan pendekatan yang berbeda-beda antara lain seperti Caldwell Method, Smith Method, Finite Element Method, dan metode idealisasi unit struktur. Untuk struktur kapal cepat (*High Speed Craft*) bermaterial komposit pendekatan yang digunakan adalah analisis dengan metode struktur 3D menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element*) dan metode analitik.

Dari pengujian tersebut akan dikaji nilai deformasi, dan tegangan yang terjadi pada struktur. Kegagalan struktur komposit ditentukan berdasarkan kekuatan laminanya. Jika terdapat kegagalan lamina maka gagalah struktur komposit tersebut. Lebih jauh lagi, kriteria kegagalan *Tsai-Wu* digunakan untuk mengetahui kegagalan lapisan awal lamina komposit. Berdasarkan hasil penelitian mengenai kekuatan struktur komposit pada lambung kapal terhadap kekuatan memanjangnya, penggunaan kriteria kegagalan *Tsai-Wu* yang paling mendekati dengan nilai eksperimen yang dilakukan. Pada panalitian ini Kriteria kegagalan *Tsai Wu* digunakan untuk mengetahui karakteristik kekuatan struktur kapal dibawah gelombang *Sagging* dan *Hogging* menggunakan material komposit dengan metode VARTM dan dilakukan pada model 3D kapal cepat.

Data Kapal

Kapal yang digunakan untuk pengujian pada penelitian ini adalah kapal cepat yang digunakan untuk patroli atau *Patrol Boat* dengan struktur *monocoque*. Data ukuran utama kapal dapat dilihat pada tabel 1. Kapal

ini dilengkapi dengan 6 penguat memanjang untuk bagian bawah lambung kapal (*Bottom*), 6 penguat memanjang untuk bagian sisi lambung kapal, dan 10 penguat memanjang untuk bagian geladak kapal. Selain itu kapal model memiliki gading membujur dengan jarak masing-masing 500 mm. Penguat kapal berbentuk *Hat Section* dengan ukuran seperti pada tabel 2a dan b.

Tabel 1. Dimensi Kapal

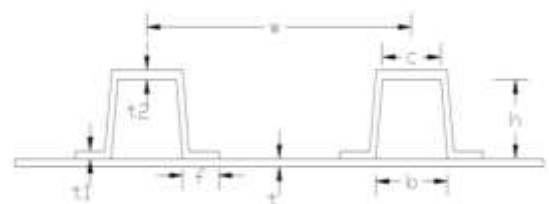
| Patrol Boat | |
|----------------------------|------------|
| LOA (Length Of All) | 28 m |
| LPP (Length Perpendicular) | 26 m |
| Breadth | 5,4 m |
| Height | 3,42 m |
| Draft | 2,95 m |
| Block Coefficient | 0,631 |
| Displacement | 285,05 Ton |
| Speed | 30 Knots |

Tabel 2a. Dimensi penguat *Hat Section*

| | t | t1 | t2 | b |
|----------------------|------|------|------|----|
| Deck and Side | 15,2 | 9,6 | 12,0 | 10 |
| Bottom | 25,6 | 12,0 | 14,4 | 12 |

Tabel 2b. Dimensi penguat *Hat Section*

| | C | w | F | h |
|----------------------|-----|-----|----|-----|
| Deck and Side | 80 | 500 | 50 | 100 |
| Bottom | 100 | 900 | 50 | 112 |



Gambar 1 Geometri *Hat Section*

Metoda Eksperimen & Fasilitas Yang Digunakan

Terdapat 3 jenis lapisan yang digunakan dalam membentuk laminasi kapal dengan menggunakan VARTM pada penelitian ini. 3 jenis lapisan tersebut yaitu Unidirectional 900/Vinyl Ester, CSM 300/Polyester, dan WR 600/Polyester. Lamina UD900/Vinyl ester dikategorikan sebagai material Ortotropik, sedangkan lamina CSM/Polyester dan WR600/Polyester dikategorikan material isotropik. Jenis lapisan yang digunakan ialah *single skin*. Sifat mekanis dari UD900/Vinyl ester (tabel 3) didapatkan dari pengujian tarik, tekan, dan flexural berdasarkan standar ASTM D3039, D6641 dan D7078.

Tabel 3. Data Mekanis Lamina

| Fiber type | Unidirectional 900 | |
|-------------------------------------|--------------------|---------------------|
| Matrix | Vinyl ester | |
| Fiber volume fraction | 0,7 | V_f |
| Longitudinal modulus | 14,948 | E_1 (GPa) |
| Transverse modulus | 6,727 | E_2 (GPa) |
| In-Plane shear modulus | 6,986 | G_{12} (GPa) |
| Major Poisson's ratio | 0,0698 | ν_{12} |
| Through thickness poisson's ratio | 0,271 | ν_{23} |
| Longitudinal tensile strength | 468,010 | σ^T_1 (MPa) |
| Longitudinal compressive strength | 139,74 | σ^C_1 (MPa) |
| Longitudinal flexural strength | 660,833 | σ^F_1 (MPa) |
| Transverse tensile strength | 14,683 | σ^T_2 (MPa) |
| Transverse compressive strength | 26 | σ^C_2 (MPa) |
| Transverse flexural strength | 48,207 | σ^F_2 (MPa) |
| Longitudinal tensile failure strain | 3,137 | ϵ_{1T} (%) |
| Transverse tensile failure strain | 0,129 | ϵ_{2T} (%) |

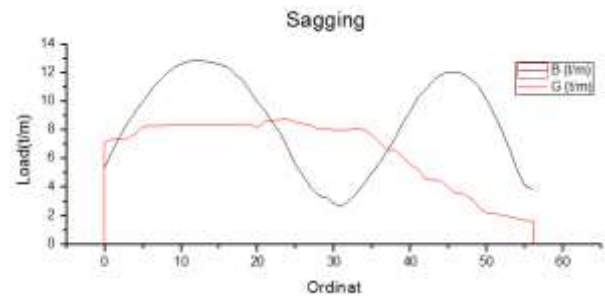
Pembuatan lambung kapal dengan metode HLU laminasi struktur memiliki karakteristik sebagai berikut: ketebalan sisi 15,21 mm dengan fiber konten 8.400, *bottom* dengan ketebalan 25,6 mm dan fiber konten 1.400, geladak dengan ketebalan 6,4 mm dan fiber konten 3.600, dan *keel* dengan ketebalan 38,42 mm dan fiber konten 21.300. Dengan metode VARTM, terdapat dua jenis susunan laminasi yang digunakan, susunan lamina *quasi isotropic* dan susunan lamina simetris. Untuk lamina *quasi isotropic*, data laminasi struktur untuk bagian sisi kapal yaitu dengan susunan $[\pm 45^0, 0^0, 45^0, 90^0, -45^0]_s$, ketebalan 6,94 mm dan fiber konten 8.800. Untuk bagian *bottom* dengan susunan $[\pm 45^0, 0^0, 45^0, 90^0, -45^0, 0^0, 45^0, 90^0]_s$, ketebalan 12,184 mm dan fiber konten 14.500. Bagian geladak memiliki susunan $[\pm 45^0, 0^0]_s$ dengan ketebalan 2,370 mm dan fiber konten 3.700. Bagian *keel* memiliki susunan $[\pm 45^0, 0^0, 45^0, 90^0, -45^0, 0^0, 45^0, 90^0, -45^0, 0^0, 45^0, 90^0]_s$ dengan ketebalan 16,618 mm dan fiber konten 21.400.

Metode Pembebanan

Pembebanan yang digunakan pada kasus ini menggunakan Analisis *hull girder load* yang memiliki pengertian gaya dan momen yang berasal dari efek air tenang, gelombang, dan dinamik yang merupakan beban lokal pada kapal dijadikan sebagai beban yang bekerja pada keseluruhan kapal.

Gelombang yang digunakan pada proses ini yaitu gelombang *Hogging* dan gelombang *Sagging*. Pada gelombang *hogging* puncak gelombang berada dibagian tengah kapal, sedangkan pada gelombang *sagging* puncak gelombang berada di ujung-ujung kapal. Koordinat gelombang *Sagging* dan *Hogging* menggunakan koefisien gelombang Hanske. Gelombang bekerja pada kondisi muatan penuh sebesar 278,177 ton, sehingga gelombang *Hogging* berada pada ketinggian air sebesar 3,269 m. Sedangkan pada kondisi *Sagging* tinggi gelombang sebesar 1,872 m. Distribusi beban akibat berat kapal (G) dan *bouyancy* (B) pada kondisi *hogging* dapat dilihat pada gambar 2, dan kondisi *Sagging* pada gambar 3.

Gambar 2 Distribusi berat kapal dan beban apung kondisi *Hogging*



Gambar 3 Distribusi berat kapal dan beban apung kondisi *Sagging*

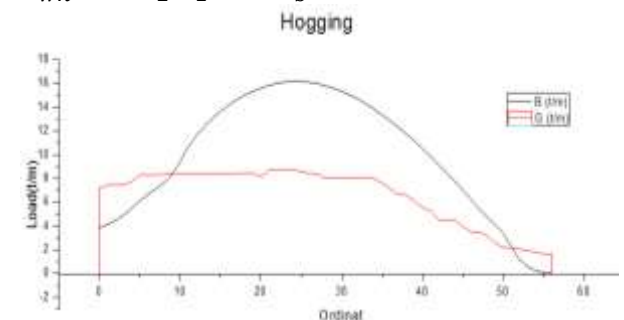
Berdasarkan petunjuk yang dikeluarkan oleh *American Bureau of Shipping (ABS) guide for building and classing high speed naval craft 2013*, nilai momen yang terjadi pada bagian tengah kapal untuk kondisi gelombang *sagging* dan *hogging* dapat diketahui melalui rumus sebagai berikut:

Wave, Sagging Moment

$$M_{ws} = -k_1 C_1 L^2 B (C_b + 0.7) \times 10^{-3}$$
 (1)

Wave, Hogging Moment

$$M_{wh} = +k_2 C_1 L^2 B C_b \times 10^{-3}$$



(2)

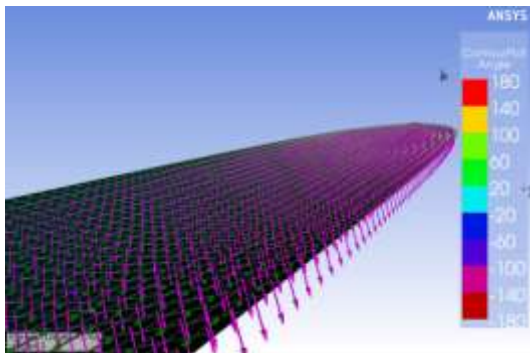
Untuk mengetahui karakteristik kekuatan memanjang, maka hanya bagian kulit dan penguat longitudinal yang digunakan dalam proses modelling. Model 3D dibuat dengan menggunakan program Autodesk Inventor, dan perhitungan kekuatan memanjang struktur menggunakan program *finite element* Ansys Workbench.



Gambar 4 Model 3 D Kapal

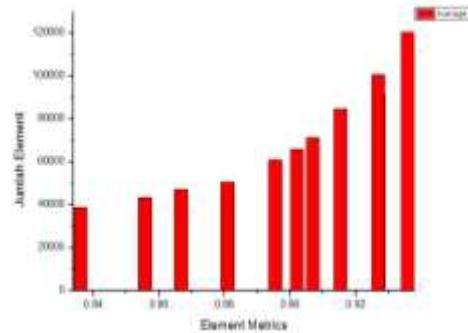
Sumbu koordinat X pada model dibuat searah panjang kapal, sumbu Y arah membujur kapal, dan sumbu Z arah horizontal kapal. Model 3D dibuat dalam bentuk *shell* dan ditransfer ke Ansys ACP (Pre).

Pada program elemen hingga Ansys lapisan lamina didefinisikan dengan tanda hitam, arah offset ditunjukkan oleh panah berwarna merah, dan arah serat ditunjukkan panah berwarna hijau (gambar5). Tipe elemen yang digunakan yaitu elemen pelat SHELL181 dengan tipe *quad4*. Mesh dilakukan dalam jumlah elemen yang berbeda beda untuk mendapatkan nilai yang konvergen.



Gambar 5 Komponen keel dengan arah serat 0°

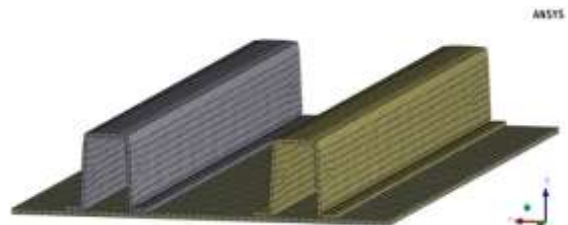
Kualitas mesh ditentukan berdasarkan pendekatan nilai *Elemen Quality*. Jumlah elemen yang digunakan dalam simulasi antara 38.843 elemen dan 120.336 elemen. Dimana elemen metrik yang paling baik yang mendekati nilai 1.



Gambar 6 Kualitas elemen rata-rata dilihat pada Elemen Quality Mesh Metric

Beban yang bekerja terdiri dari beban berat kapal dan tekanan yang diakibatkan oleh *Bouyancy*. Distribusi berat kapal dan tekanan air akibat gelombang di aplikasikan pada bagian *frame* kapal sebagai *line force*. Untuk menghindari model mengalami perpindahan terlalu besar maka dilakukan pembatasan terhadap model. Pada frame 0, node dibagian sumbu netral dibuat mati (*fixed*), sedangkan node pada bagian tengah *deck* dibuat bebas pada arah horizontal. Pada frame 53, node dibagian sumbu netral dibuat bebas pada arah vertikal.

Selain menguji kekuatan memanjang kapal, pengujian untuk mengetahui deformasi yang terjadi dilakukan pada bagian pelat diantara frame melintang kapal, hal ini dikarenakan pada kapal kecil kekuatan melintang lah yang lebih dominan mempengaruhi struktur kapal. Pengujian dilakukan dengan jarak antara stiffner (*Span*) yang berbeda beda. Jarak frame yang digunakan saat ini sebesar 500 mm. Tipe elemen yang digunakan yaitu elemen pelat SHEL181 dengan tipe *quad4*. Proses mesh yang digunakan yaitu *fine* dengan jumlah elemen 10.854 (gambar 7). Untuk melakukan simulasi, semua sisi dibuat *fixed* untuk semua arah perpindahan dan rotasi. Beban lokal yang berasal dari tekanan air pada bagian *bottom* ditentukan berdasarkan peraturan *ABS guide for building and classing high speed naval craft 2013*, dengan nilai 0,0547 Mpa.



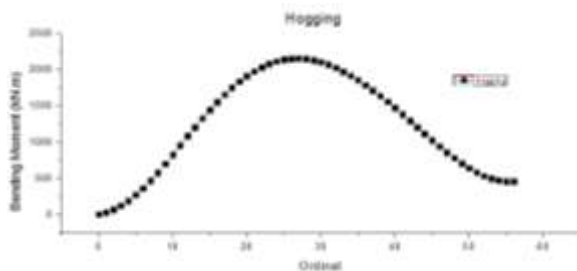
Gambar 7 Mesh dengan jumlah elemen 10854 untuk jarak antar frame 500 mm

Hasil dan Pembahasan

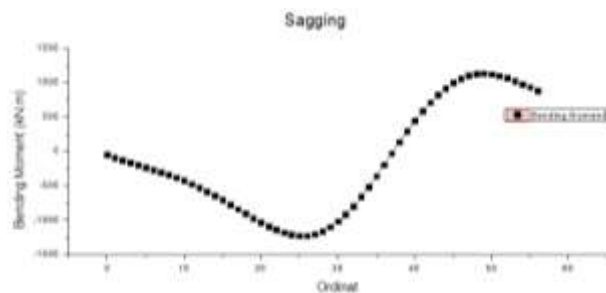
Analisis

Kekuatan Memanjang Kapal

Distribusi gaya longitudinal akibat berat dan gaya apung kapal yang berasal dari gelombang *Hogging* dan *Sagging* menghasilkan distribusi gaya geser vertikal dan momen tekuk vertikal. Momen tekuk (*Bending Moment*) pada bagian tengah kapal atau *midship* berada di ordinat 28 pada kondisi *Hogging* bernilai 219,68 t.m atau 2152,86 kN.m. (gambar 8) Sedangkan pada kondisi *Sagging* bernilai -118,178 t.m atau -1158,144 kN.m (gambar 9). Perbedaan nilai *Wave Bending* dengan peraturan kalisifikasi yaitu sebesar 6,69% dan 58,89% masing-masing untuk kondisi *Hogging* dan *Sagging*.

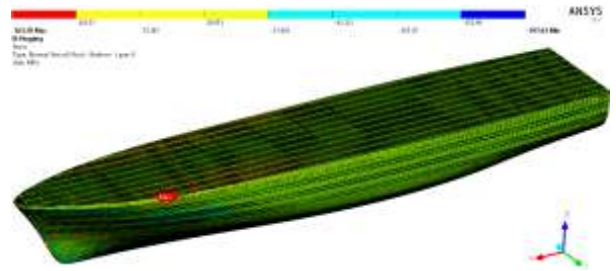


Gambar 8 Distribusi bending moment vertical kondisi hogging

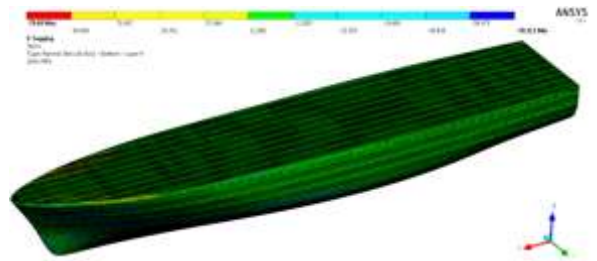


Gambar 9 Distribusi bending moment vertical kondisi sagging

Berdasarkan pengujian numerik dengan jumlah elemen yang berbeda didapatkan nilai tegangan pada kondisi *Hogging* dan *Sagging* dengan susunan lamina *quasi isotropic* (gambar 10a dan 10b). Dari grafik diketahui bahwa jumlah elemen mempengaruhi nilai tegangan yang terjadi pada struktur. Nilai akhir tegangan ditentukan setelah terjadinya suatu nilai yang konvergen untuk tiap kenaikan jumlah elemen.



Gambar 10a Tegangan longitudinal pada kondisi hogging lamina *quasi isotropic*



Gambar 10b Tegangan longitudinal pada kondisi sagging lamina *quasi isotropic*

Pada susunan lamina *quasi isotropic* dengan menggunakan metode VARTM, nilai tegangan struktur kapal pada arah longitudinal dengan jumlah elemen sebanyak 120.036 pada kondisi *Hogging* bernilai maksimum 163,45 MPa dan minimum -197,61 Mpa. Sedangkan pada kondisi *Sagging* bernilai maksimum 79,69 MPa dan minimum -70,311 MPa. Nilai positif mengartikan tegangan tarik dan nilai negatif adalah tegangan kompresi.

Sedangkan pada lapisan lamina simetris dengan jumlah elemen 120.036 pada kondisi *Hogging* bernilai maksimum 159,16 MPa dan minimum -190,82 Mpa. Sedangkan pada kondisi *Sagging* bernilai maksimum 75,493 MPa dan minimum -63,857 MPa.

Berdasarkan grafik pada gambar 8 dan 9, nilai *bending moment* terbesar berada pada frame 28. Akan tetapi nilai tegangan terbesar tidak terjadi pada bagian tersebut baik pada kondisi gelombang *Hogging* maupun *Sagging* pada saat dilakukan pengujian dengan metode *finite element*, hal ini dikarenakan bentuk kapal yang tidak seragam untuk tiap frame nya, nilai *section modulus* semakin kecil setelah frame 28. Hal inilah yang menyebabkan tegangan maksimum berada antara frame 41-42. *Boundary condition* yang diaplikasikan di ujung kapal pada saat melakukan simulasi juga mempengaruhi nilai tegangan maksimum. Pada kondisi nyata, kapal tidak mengalami kondisi dimana gerakan translasi dan rotasi nya dibuat tidak dapat bergerak, sedangkan untuk melakukan simulasi hal ini perlu dilakukan untuk menghindari tidak berjalannya proses komputasi.

Lebih besarnya tegangan yang terjadi pada struktur kapal dengan susunan lamina *quasi isotropic*

dibandingkan dengan lapisan lamina simetris diakibatkan oleh nilai modulus elastisitas (E). Berdasarkan hasil pengujian tarik arah longitudinal, nilai *tensile modulus* laminasi *quasi isotropic* yaitu 23,819 GPa untuk bagian *bottom* dan 25,679 GPa untuk bagian *side*. Sedangkan nilai *tensile modulus* longitudinal laminasi simetris yaitu 25,131 GPa untuk bagian *bottom* dan 33,61 GPa untuk bagian *side*. Perbedaan nilai modulus elastisitas ini diakibatkan oleh susunan arah serat. Susunan lamina *quasi isotropic* menyebabkan nilai modulus elastisitas longitudinal dan transversal bernilai sama, sedangkan pada lapisan lamina simetris nilai modulus elastisitas transversal bernilai jauh lebih kecil dibandingkan dengan nilai modulus elastisitas transversalnya. Hal inilah yang menyebabkan tegangan struktur pada lapisan lamina *quasi isotropic* bernilai lebih besar dibandingkan lapisan simetris.

Selain itu, hasil pengujian menunjukkan tegangan tarik bagian *bottom* bernilai 278 MPa dengan standar deviasi 436 untuk laminasi *quasi isotropic* dan 263,33 MPa dengan standar deviasi 6.03 untuk laminasi simetris. Untuk bagian *side*, tegangan tarik bernilai 253,08 MPa dengan standar deviasi 1,84 untuk laminasi *quasi isotropic*, dan 281,67 MPa dengan standar deviasi 11,93 untuk laminasi simetris. Jika nilai dari hasil pengujian tarik *laminated* terkecil dibandingkan dengan nilai tegangan maksimum struktur maka *safety factor* bernilai 1,280 untuk struktur lapisan *quasi isotropic* dan 1,37 untuk struktur lapisan simetris.

Berdasarkan hasil simulasi diketahui bahwa gelombang *Hogging* yang menyebabkan tegangan paling besar pada struktur kapal sehingga untuk mengetahui karakteristik kekuatan lamina digunakanlah kondisi ini. Dari keseluruhan bagian kapal, diambil masing masing satu elemen untuk bagian geladak, *side*, *bottom*, dan *keel* yang memiliki nilai Tsai Wu kriteria paling besar. Dari elemen tersebut dilihatlah kegagalan pada 1 titik.

Pada bagian *keel*, elemen yang dipilih untuk dianalisis nilai kegagalannya yaitu titik pada elemen 25.140, pada titik tersebut nilai kriteria Tsai Wu terbesar pada lapisan simetri dengan nilai 0,722, dan untuk lapisan lamina *quasi isotropic* bernilai 0,686. Lapisan terlemah terjadi pada lapisan pertama yaitu lapisan biaxial. Untuk bagian *bottom*, titik pada elemen 73.009 memiliki nilai kriteria Tsai Wu paling besar, pada titik tersebut tegangan paling besar terjadi pada lapisan keempat dengan nilai 0,977 untuk lapisan *quasi isotropic* dan 0,946 untuk lapisan *simetri*. Pada bagian *side* elemen 40.969, nilai kriteria Tsai Wu paling besar terjadi pada lapisan pertama dengan nilai 0,903 untuk lapisan *quasi isotropic* dan 0,874 untuk lapisan simetris. Bagian geladak menggunakan elemen 30.038, dengan lapisan terlemah berada pada lapisan paling akhir dengan nilai 0,5675 untuk lapisan *quasi isotropic* dan lapisan

simetris.

Dari semua bagian struktur kapal, dapat terlihat jelas bahwa posisi dan arah serat lapisan mempengaruhi nilai kriteria Tsai Wu. *Ultimate Tensile Strength* (UTS) lapisan lamina terlemah terjadi pada arah serat 90° kemudian arah 45°. Akan tetapi kriteria Tsai Wu tidak hanya memperhitungkan kekuatan lamina hanya pada arah longitudinal serat tetapi juga arah transversal dari serat. Arah serat 45° menjadi lapisan terlemah karena memiliki nilai UTS yang kecil dengan nilai yang sama pada arah longitudinal dan transversal. Dari ketiga struktur (*keel, side, deck*) lapisan biaxial dengan arah serat 45°/-45° memiliki nilai kriteria Tsai Wu yang paling besar, hal ini juga dipengaruhi posisinya yang paling pertama kali menerima beban. Pada struktur *bottom* lapisan terlemah terjadi pada arah 90°.

Berdasarkan pengujian *laminated*, lapisan simetri memiliki kekuatan yang lebih baik dibandingkan lapisan *quasi isotropic*. Akan tetapi jika dibandingkan dengan nilai pada kriteria kegagalan Tsai Wu, lapisan *quasi isotropic* memiliki nilai yang lebih baik dibandingkan dengan lapisan simetris. Hal ini dikarenakan kriteria kegagalan Tsai Wu memperhitungkan tegangan untuk semua arah (x,y,z), sedangkan lapisan *quasi isotropic* memiliki tegangan material yang bernilai sama untuk semua arah.

Keseluruhan lapisan tidak ada yang melebihi angka maksimum kriteria Tsai Wu yaitu bernilai 1. Nilai lapisan yang paling mendekati nilai 1 terjadi pada bagian *bottom* dengan nilai 0,977 dan *side* dengan nilai 0,903 pada lapisan *quasi isotropic*. Hal ini harus mendapat perhatian khusus untuk dilakukan perubahan baik dari ketebalan lapisan dan pengaturan arah serat.

Jarak antar frame melintang kapal yang disyaratkan badan klasifikasi bernilai 500 mm memiliki nilai deformasi sebesar 3,3547 mm jika menggunakan struktur komposit *quasi isotropic* dan bernilai 3,365 mm jika menggunakan struktur simetris, melewati batas deformasi sebesar 2,5 mm yang diizinkan. Agar dapat masuk pada nilai deformasi yang diizinkan oleh badan klasifikasi maka jarak antar frame harus berada pada jarak antara kurang dari 450 mm.

Perubahan jarak frame melintang dari 500 mm menjadi 400 mm mengakibatkan penambahan 14 buah frame melintang. Dengan menggunakan jarak antar frame melintang sebesar 400 mm, maka akan terjadi penambahan bahan baku fiber sebesar 28,43% atau 2,257 ton, dan pengurangan penggunaan resin sebesar 18,22% atau 3,140 ton dibandingkan dengan menggunakan metode *Hand Lay up* dengan jarak frame 500 mm.

Tabel 4. Perbandingan Kebutuhan Material

| | Lambung | | Frame melintang | | Longitudinal | | Total (Ton) | |
|-----------------------|---------|-------|-----------------|-------|--------------|-------|-------------|--------|
| | Fiber | Resin | Fiber | Resin | Fiber | Resin | Fiber | Resin |
| HANDLAY UP (S=500 mm) | 3.289 | 7.146 | 3.212 | 6.958 | 1.435 | 3.132 | 7.937 | 17.236 |
| VARTM (S=500 mm) | 4.609 | 1.975 | 3.212 | 6.958 | 1.435 | 3.132 | 9.257 | 12.065 |
| VARTM (S=400 mm) | 4.609 | 1.975 | 4.150 | 8.988 | 1.435 | 3.132 | 10.194 | 14.095 |

Kesimpulan

Ketebalan bagian lambung kapal dengan metode VARTM didapatkan dengan menyamakan nilai fiber konten pada proses *Hand Lay Up*. Dari ketebalan yang didapatkan maka disusunlah lamina dengan 2 konfigurasi, *quasi isotropic* dan simetris. Nilai tegangan struktur terjadi paling besar pada *laminat quasi isotropic* saat gelombang *Hogging*. Akan tetapi berdasarkan kriteria kegagalan lamina Tsai Wu, lapisan *quasi isotropic* memiliki kekuatan yang lebih baik dibandingkan dengan lapisan simetris. Hal ini dikarenakan lapisan *quasi isotropic* memiliki nilai kekuatan lamina yang sama untuk tiap arahnya. Untuk menghindari nilai deformasi struktur melebihi yang disyaratkan oleh badan klasifikasi pada metode VARTM maka jarak antar frame melintang yang baik yaitu kurang dari 450 mm. Dengan terjadinya penambahan frame melintang pada metode VARTM, penggunaan material resin tetap bisa dikurangi hingga 18,22% dibandingkan metode *Hand Lay Up*.

Ucapan Terima kasih

Ucapan terima kasih ditujukan kepada PT Justus Sakti Raya yang telah memberikan material fiber glass maupun resin untuk pembuatan specimen dan Pak Markus yang telah memberikan masukan yang sangat berguna dalam penelitian ini, demikian juga untuk ibu Anne Zulfia dari Departemen Metalurgi dan Material Universitas Indonesia yang telah banyak membantu di dalam menganalisis hasil pengujian.

Nomenklatur

| | |
|----------|---|
| ASTM | American Standards for the Testing of Materials |
| B | lebar kapal |
| C_1 | koefisien fungsi panjang kapal |
| C_b | Koefisien blok |
| GPa | giga Pascal |
| k_1 | koefisien momen sagging |
| k_2 | koefisien momen hogging |
| L | panjang kapal |
| MPa | mega Pascal |
| M_{ws} | momen gelombang sagging |
| M_{wh} | momen gelombang hogging |

Referensi

ABS.2013.High Speed Naval Craft.. American Bureau of Shipping. New York.
Aufar K.Kaw.Mechanics Of Composite.Taylor & Francis Group.2006.New York
Caldwell JB. Ultimate longitudinal strength. Trans Roy Inst Naval Architect 1965;107:411-30.

Chen KY, Kutt LM, Piaszczyk CM, BieniekMP. Ultimate strength of ship structures. SNAME Trans 1983;91:149-68.
Chen-Zhong Nian. Reability assesment for ultimate longitudinal strength ship hulls in composite materials.2007.Elsevier.
Smith CS. Influence of local compressive failure on ultimate longitudinal strength of a ship's hull. In: Proc. int. symp. on practical design in shipbuilding. 1977. p. 73-9.
Ueda Y, Rashed SMH. The idealized structural unit method and its application to deep girder structures. Compute Structure 1984;18(2):227-93.