



Analisis Kekuatan Laminasi Serat Bambu Apus Dan *Fiberglass* (*Chopped Strand Matt*) Dengan Bentuk Lengkung (*Curve*)

Hilmy Charis Alfareza Hariyanto¹⁾, Parlindungan Manik²⁾, Ahmad Firdhaus³⁾
Laboratorium Teknologi Material, Las, dan Produksi Kapal
Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275
^{*)}e-mail : hilmyhariyanto@students.undip.ac.id

Abstrak

Penggunaan bahan komposit berbasis serat alami semakin ditingkatkan sebagai alternatif dari material konstruksi kapal yang lebih ramah lingkungan dan memiliki karakteristik mekanik yang unggul. Bambu apus (*Gigantochloa apus*) adalah salah satu jenis serat alami yang berpotensi dikembangkan menjadi material komposit struktural, mengingat ketersediaannya yang baik serta kemampuan mekaniknya yang memadai. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji dampak variasi sudut kelengkungan terhadap kekuatan impact dan kekuatan tekuk dari komposit laminasi bambu apus dan fiberglass menggunakan matriks resin epoxy. Spesimen dirakit dengan metode hand lay-up yang terdiri dari lapisan laminasi bambu apus dan fiberglass chopped strand mat pada sudut kelengkungan yang bervariasi, yaitu 0° , $8,74^\circ$, $17,10^\circ$, dan $24,77^\circ$. Pengujian kekuatan impact dilakukan sesuai standar ISO 179-1, sedangkan pengujian kekuatan tekuk mengikuti standar ASTM D7264 dengan metode three-point bending. Temuan penelitian menunjukkan bahwa peningkatan sudut kelengkungan berdampak positif terhadap sifat mekanik dari komposit. Nilai kekuatan impact mengalami peningkatan dari $108,06 \text{ kJ/m}^2$ pada sudut 0° menjadi $138,90 \text{ kJ/m}^2$ pada sudut $24,77^\circ$. Di sisi lain, kekuatan tekuk meningkat dari $326,50 \text{ MPa}$ menjadi $380,87 \text{ MPa}$. Semua spesimen memenuhi batas minimum kekuatan tekuk sesuai dengan Rules for Fiberglass Reinforced Plastic Ships yang dikeluarkan oleh Biro Klasifikasi Indonesia (BKI). Variasi sudut kelengkungan $24,77^\circ$ menunjukkan karakteristik mekanik terbaik dan berpotensi digunakan sebagai material alternatif dalam struktur kapal dengan bentuk melengkung.

Kata Kunci : Uji Impact, Uji Tekuk, Komposit, Lengkung, Fiberglass, Bambu Apus

1. PENDAHULUAN

Saat ini, kayu mengalami penurunan ketersediaan yang semakin meningkat dikarenakan permintaan yang semakin tinggi dan berakibat kepada pasokan kayu yang semakin sedikit akibat eksploitasi yang dilakukan secara berlebihan dan terus menerus [1]. Teknologi pada kondisi sekarang telah meningkat cukup pesat, saat ini industri perkapalan telah menciptakan material pengganti atau alternatif yang dapat digunakan yakni material bambu laminasi. Bambu laminasi merupakan alternatif material yang di proses dengan menjadikan beberapa bilah bambu dengan ukuran yang seragam, lalu direkatkan dan dibentuk sesuai yang

diinginkan [2]. Salah satu material pengganti yang memiliki potensial dan berbasis serat alami adalah bambu apus (*Gigantochloa Apus*) merupakan material yang mudah didapatkan di wilayah Indonesia. Selain itu bambu apus memiliki kekuatan mekanik serta ramah lingkungan. Sehingga ini merupakan potensial yang dapat digunakan sebagai material komposit pada lambung kapal [3].

Perkembangan serta pemanfaatan material komposit saat ini sangat bervariasi dan inovatif, bersamaan dengan tingginya permintaan material yang semakin luas. Material komposit pada saat ini telah dikembangkan sebagai bahan alternatif untuk logam dan kayu. Material komposit matriks

epoxy saat ini sedang dalam tahap pengembangan karena seratnya susah terurai secara alami[4]. Penggunaan komposit serat alam lebih terjangkau begitu juga dengan bahannya yang mudah diperbaharui dan didapatkan.

Komposit adalah material yang terdiri dari dua atau lebih komponen berupa plastik, resin dan bahan penguat yang berupa serat[5]. Dimana serat ini berperan sebagai penguat yang mana akan diperoleh produk yang kuat serta berperan untuk mengurangi pemakaian resin[6]. Bambu laminasi merupakan salah satu material komposit. Bambu memiliki banyak potensi yang dapat dikembangkan sebagai biokomposit karena tahan lama, murah, dapat didaur ulang, ramah lingkungan, serta memiliki potensi yang melimpah di Indonesia[7].

Fiberglass ialah material komposit yang terdiri dari serat kaca yang diperkuat dengan resin polimer, umumnya resin epoksi atau poliester. Umumnya, serat kaca dihasilkan melalui metode menarik atau meniup serat kaca cair melewati lubang kecil hingga membentuk serat panjang dan tipis. Sifat menguntungkan dari *fiberglass* ini meliputi kekuatan tinggi, ringan, ketahanan terhadap korosi, serta ketahanan terhadap pengaruh lingkungan. Karena karakteristik ini, *fiberglass* sering diterapkan dalam berbagai aplikasi, termasuk konstruksi kapal. *Fiberglass* adalah salah satu bahan yang paling sering digunakan dalam serat ini. Sebagai contoh, sebuah jet tempur dibuat dengan 12% komposit yang diperkuat *fiberglass* dan 70% diperkuat serat karbon komposit dalam strukturnya [8].

Komposit bambu dengan arah laminasi searah (0°) menunjukkan sifat mekanik yang unggul arah dibanding dengan arah lamiansi dua arah (180° dan $0^\circ/90^\circ$). Hanya komosit dengan arah laminasi searah yang memenuhi kebutuhan ambang batas kekuatan Klasifikasi Biro[9].

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan tentang “Analisis Kekuatan Lentur Balok Laminasi Lengkung Dengan Perekat Epoxy” bisa di simpulkan kekuatan lentur balok laminasi lengkung dengan perekat epoxy dapat menahan beban rata-rata 85,45 kg dan *defleksi* 23,51 mm. Diperoleh juga hasil bahwa semakin besar lengkungan maka beban yang akan diperoleh semakin besar, begitu pula semakin kecil lengkungan maka *defleksi* semakin besar yang akan didapat[10].

Pada saat ini kapal yang berada di wilayah Indonesia pada umumnya menggunakan material baja. Dan dengan adanya inovasi ini diharapkan pembentukan serat bambu apus dengan cetakan lengkung berpenguat *fiberglass* dengan berbagai sudut, karena di kapal tidak hanya berbentuk datar saja, namun ada beberapa material pada kapal mengharuskan untuk lengkung seperti yang terdapat pada gading-gading kapal, lambung kapal, lunas dan badan kapal.

Meskipun berbagai penelitian telah membahas karakteristik mekanik komposit bambu laminasi dan pengaruh penambahan *fiberglass*, kajian mengenai perilaku komposit bambu apus berpenguat *fiberglass* pada kondisi bentuk melengkung dengan variasi sudut kelengkungan masih sangat terbatas. Padahal kondisi tersebut banyak dijumpai pada struktur kapal. Oleh karena itu diperlukan penelitian untuk mengevaluasi pengaruh variasi sudut kelengkungan terhadap kekuatan impak dan kekuatan tekuk komposit sebagai dasar pengembangan material alternatif konstruksi kapal.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui uji impak dan tekuk terhadap laminasi serat bambu apus sebagai material pengganti lambung kapal.

2. METODE

2.1. Komposit

Komposit merupakan material yang terbentuk dari beberapa fase yang dibuat secara sintesis dengan penggabungan karakteristik terbaik yang diharapkan dari komponennya, umumnya komposit terdiri dari satu fase kontinu (matriks) dan fase lainnya yang mengelilinginya (fase terdispersi). Mungkin efisiensi kekuatan paling tinggi pada beberapa tipe komposit adalah komposit yang diperkuat serat. Komposit yang diperkuat serat akan membuat beban yang diterapkan untuk kemudian dialihkan dan disebarkan di antara serat-serat melalui fase matriks, atau serat dapat meningkatkan ketahanan komposit. Penguatan pada komposit akan menjadi penting hanya jika hubungan antara serat dan matriks itu kuat, ini disebabkan oleh fakta bahwa kekuatan penguat berhenti di ujung serat, dan efektivitas penguat tergantung pada panjang serat [11].

Sifat-sifat komposit tergantung pada kekuatan serat sebagai salah satu elemen utama dalam komposit. Kekuatan tarik komposit dipengaruhi jumlah serat, di mana

semakin tinggi jumlah serat, semakin tinggi pula kekuatan tariknya. Namun, kekuatan tarik yang tinggi tidak selalu menjamin perbaikan sifat-sifat lainnya. Oleh sebab itu, perbandingan antara kuantitas resin dan serat sangat penting dalam menentukan sifat material komposit [12].

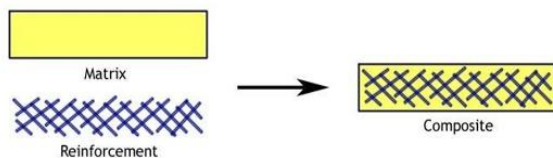


Figure 1. Susunan Komposit

2.2. Bambu Apus

Bambu apus berasal dari genus *Gigantochloa* yang memiliki rumpun yang padat. Nama ilmiah dari bambu apus adalah *Gigantochloa Apus* Bl. Bambu apus dikenal dengan istilah bambu tali, awi tali atau pring tali [8]. Bambu apus banyak ditemukan di datara rendah dan tinggi, tepi sungai dan batas desa. Tujuan utama dari penanamannya adalah untuk memanfaatkan batang pohon sebagai bahan konstruksi, peralatan rumah tangga dan alat musik tradisional [13].

Penelitian ini memanfaatkan bahan bambu apus karena bambu sering dijadikan bahan dasar untuk konstruksi bangunan. Selain digunakan dalam pembangunan kapal, bambu serta kayu dimanfaatkan sebagai pembangunan jembatan dan rumah tradisional. Ini dikarenakan bambu adalah salah satu material yang hemat biaya dan gampang didapat [14].

Table 1. Karakteristik Bambu Apus

Kingdom	Plantae
Ordo	Poales
Family	Poaceae
Subfamily	Bambusoideae
Bangsa	Bambuseae
Genus	<i>Gigantochloa</i>
Spesies	<i>Gigantochloa apus</i>
Asal	Asia tenggara
Manfaat	Bahan bangunan dan kayu struktural. Contoh : tiang rumah, andang-andang perahu, semah-semah perahu, dan lain-lain.
Ukuran terbesar	Panjang ruas : 20-60 cm

Garis tengah : 4–15 cm
Tinggi buluh : 22 m
Tebal buluh : 15-36 mm



Figure 2. Bambu Apus

Selain itu, penggunaan bambu apus sebagai material pengganti kayu pada kapal disebabkan oleh bambu apus memiliki sifat mekanik sebagai berikut [15]:

Table 2. Sifat Mekanik Bambu Apus

Sifat mekanik	Mpa
Kekuatan tarik	53,53
Kekuatan luluh	32,06
Modulus elastisitas	9901,96
Kekuatan tekan	49,41
Kekuatan geser	3,872
Kekuatan Tarik tegak lurus serat	2,77

Pada penelitian ini bahan yang akan digunakan ialah bambu apus karena mempunyai kemampuan serat yang kuat dan dinilai lebih baik, ringan dan sering digunakan untuk membuat konstruksi atau bangunan lainnya. Maka melihat dari perspektif penelitian bambu laminasi yang diadakan dengan resin sebagai perekat yang akan diujikan untuk mengetahui kekuatan bambu laminasi dalam kondisi melengkung tersebut. Setelah itu spesimen akan dilakukan 2 kali pengujian dan nantinya akan diambil nilai rata-rata dari hasil pengujian.

2.3. Laminasi Bambu

Bambu laminasi merupakan produk yang dihasilkan dari mengkombinasikan beberapa material menjadi satu yang di bedakan menjadi laminasi sejajar serta laminasi menyilang. Struktur *gluelam* memiliki sejumlah keunggulan, termasuk meningkatkan kemampuan dimensi, bentang yang lebih panjang, kemampuan untuk membuat bentuk penampang melengkung,

dan berbagai konfigurasi bentuk lonjong dapat diproduksi dengan efisien. Selain itu, bambu laminasi dapat mengurangi perubahan bentuk dan penurunan kekuatan akibat cacat kayu, serta juga memungkinkan pembuatan bentuk acak dengan lebih mudah [16].

2.4. Papan Laminasi

Dalam dunia teknologi, istilah "laminasi" merujuk pada metode pembuatan material dengan menempelkan lapisan-lapisan menggunakan bahan perekat (*adhesive*). Ketika berbicara tentang kayu laminasi, istilah ini mengacu pada produk yang terdiri dari beberapa lapisan kayu yang diikat menggunakan lem. Namun, istilah "laminasi" juga dapat merujuk pada lembaran tipis yang dibuat dengan tampilan menyerupai kayu melalui proses pencetakan. Secara umum, salah satu bahan yang perlu diperhatikan saat membuat papan laminasi adalah jenis lem perekatnya, yang dapat digunakan untuk menggabungkan potongan beberapa bilah.

2.5. EPOXY

Pada penelitian ini, pembentukan material komposit dilaksanakan dengan serat bambu yang disusun menggunakan perekat resin *epoxy*. Resin *epoxy* merupakan jenis perekat bersifat *thermosetting* dan dalam strukturnya terdapat dua atau lebih fungsi *epoxy*. Resin ini menunjukkan kemampuan penyerapan air yang sangat baik, mampu bertahan pada suhu tinggi, serta tahan terhadap korosi dan reaksi kimia. Memiliki sifat transparan, sangat elastis, tahan terhadap bahan kimia, dan mempunyai kekuatan rekat yang baik [17]. Resin ini umumnya dimanfaatkan sebagai bahan perekat dan pelapis pelindung yang efektif karena mempunyai kekuatan yang besar serta daya rekat yang tinggi [18].



Figure 3. Resin Epoxy dan Hardener

2.6. Fiberglass (CSM)

Fiberglass adalah komposit yang terbuat dari serat kaca. Secara umum, itu digunakan sebagai bahan untuk pembuatan kapal, serta

pendekatan yang logis namun mudah untuk menganalisis struktur lambung kapal *fiberglass*. Temuan lain mengungkapkan bahwa penambahan alas *fiberglass* pada LBC saat ini meningkatkan sifat mekanik dibandingkan penelitian sebelumnya, secara eksplisit kekuatan lentur meningkat sekitar 4,02–7,56% dan kekuatan tarik pada kisaran 12,44–17,73%. Diketahui hanya benda uji dengan 7 lapisan yang memenuhi ambang batas kuat lentur dan tarik Biro Klasifikasi Indonesia [19].



Figure 4. Fiberglass CSM

2.7. Prosedur Pembuatan Bahan Uji

Bahan yang dipilih dalam studi ini mencakup bambu apus, *Fiberglass*, dan *Epoxy*. Berikut adalah prosedur untuk membuat spesimen. Pertama, bambu dipotong sepanjang 50 cm dari bagian atas tanaman. Selanjutnya, bambu tersebut dipotong menjadi irisan dengan ukuran 400 mm × 20 mm × 0.5 mm menggunakan pisau khusus. Setelah bambu berbentuk bilah, proses penyambungan dimulai dengan susunan lapisan yang terdiri dari susunan bilah bambu, *epoxy*, dan *fiberglass* yang dilakukan secara berurutan hingga terdapat tujuh lapisan. Di tahap ini, spesimen diproduksi di atas cetakan. Setelah semua lapisan selesai bahan tersebut dipadatkan dengan cetakan baja agar setiap lapisan bisa melekat dengan baik. Spesimen dibiarkan 24 jam. Setelah itu, langkah berikutnya memotong spesimen sesuai dengan standar yang telah ditentukan.



Figure 5. Pembuatan Spesimen

2.8. Parameter Pengujian

2.8.1 Parameter Tetap

a. Uji Impak

Pengujian impak dilaksanakan untuk mengukur kekuatan sampel yang akan di uji dengan menemukannya secara tiba-tiba untuk menilai keuletannya. Seperti yang terlihat pada gambar 7 mengenai pengujian impak.

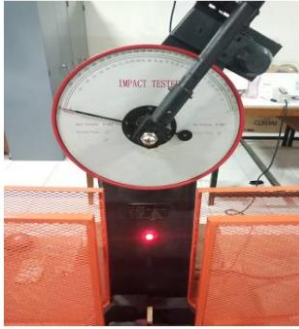


Figure 6. Proses Pengujian Impak

Dalam kajian ini, standar yang ditetapkan adalah ISO 179-1 dengan dimensi sampel 80 mm × 10 mm × 10 mm. kekuatan uji impak dihitung menggunakan persamaan 1:

$$\frac{W}{b \times h}$$

Dimana **W** merujuk kepada jumlah tenaga yang diserap oleh objek yang diuji dalam unit (J), **b** menunjukkan lebar objek yang diuji dengan satuan (mm), dan **h** menggambarkan ketebalan objek yang diuji dalam satuan (mm)

b. Uji Tekuk

pengujian tekuk dilakukan untuk mengukur seberapa lentur suatu spesimen dengan menekan bagian tengah spesimen secara perlahan hingga mengalami kerusakan. Seperti yang terlihat dalam gambar 8 yang menunjukkan pengujian tekuk.



Figure 7. Proses Pengujian Tekuk

Dalam studi ini, norma yang digunakan mengikuti ASTM D-7264 dengan

dimensi spesimen 130 mm × 13 mm × 10 mm. Besar tegangan maksimum dapat dihitung melalui rumus 2.

$$\sigma = \frac{3FL}{2bd^2}$$

Dimana σ merupakan kekuatan tekuk yang diukur dalam satuan (Mpa), **F** adalah gaya yang diantakan dala satuan (N), **L** adalah material saat dibandingkan dengan spesimen uji yang juga diukur dalam satuan (mm), dan **d** adalah ketebalan spesimen uji dengan satuan (mm).

2.8.2 Parameter Peubah

Dalam studi ini, modifikasi cetakan melengkung ini dibuat dalam empat tipe spesimen, masing-masing memiliki sudut melengkung yang berbeda, yaitu:

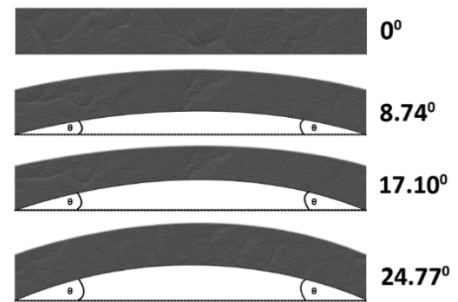


Figure 8. Variasi sudut spesimen

Spesimen 0° (tanpa kelengkungan): spesimen ini memakai cetakan datar tanpa adanya sudut melengkung. Variasi ini berfungsi sebagai pengendali untuk menilai karakteristik dasar dari komposit tanpa pengaruh kelengkungan. Spesimen ini memungkinkan untuk menganalisis perbedaan.

Spesimen 8.74°: Model pada spesimen ini menunjukkan lengkungan dengan sudut 8.74°. Lengkungan yang tidak terlalu ekstrem ini mencerminkan keadaan di mana bahan hanya mengalami penekanan yang minimal. Analisis pada sudut ini memungkinkan penilaian bagaimana sedikit perubahan dalam lengkungan memengaruhi elastisitas, serta ketahanan terhadap perubahan bentuk.

Spesimen 17.10°: Pada spesimen ini, sudut lengkung mengalami peningkatan menjadi 17.10°, yang menambah tingkat tekanan lebih besar pada serat bambu dan fiberglass selama tahap pencetakan. Dengan lengkungan

yang lebih besar, spesimen ini berfungsi untuk mengeksplorasi dampak dari peningkatan lengkungan terhadap distribusi beban dan kemampuan fleksibilitas bahan komposit.

Spesimen 24.77°: Spesimen ini dengan sudut lengkung 24.77° menunjukkan variasi lengkungan tertinggi pada penelitian ini. Sudut ini menciptakan situasi yang lebih ekstrim untuk menguji ketahanan material bambu-fiberglass terhadap deformasi yang lebih besar. Variasi ini diharapkan dapat menunjukkan batas fleksibilitas dan kekuatan yang dapat dicapai oleh bahan tanpa mengalami kerusakan.

2.9. Lokasi Pengujian

Lokasi pembuatan spesimen dilaksanakan di laboratorium Teknik Perkapalan, Kota Semarang. Uji tekuk dan dampak dilakukan di Laboratorium Teknologi Material dan Produksi Kapal, Fakultas Teknik Perkapalan, Universitas Diponegoro, Semarang.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Uji Impak

Hasil uji dampak yang telah dilaksanakan seperti yang dipaparkan dalam tabel 1.

Tabel 1. Data Uji Impak

Variasi Sudut	Rata-rata b (mm)	Rata-rata d (mm)	Energi (J)	Kuat Impak (J/mm ²)
0	10,41	8	9	108,06
8,7	10,12	8	9,3	110,6
17,10	10,55	8	10,3	127,63
24,77	11,10	8	12,3	138,9

Data dalam tabel 1 menunjukkan bahwa harga dampak rata-rata tertinggi terlihat pada spesimen variasi sudut 24,77° dengan nilai 138,9 J/mm², sedangkan nilai dampak rata-rata terendah berada pada variasi sudut 0° yang bernilai 108,06 J/mm². Hal ini dapat dilihat pada gambar 9.

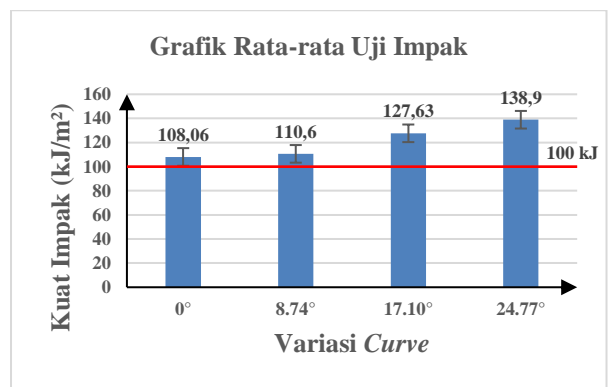


Figure 9. Grafik Uji Impak

Mengacu pada Rules for Fiberglass Reinforced Plastic Ships oleh Biro Klasifikasi Indonesia, belum ditemukan persyaratan minimum yang secara spesifik mengatur batas nilai kekuatan dampak untuk material komposit bambu-fiberglass. Oleh karena itu, evaluasi dilakukan dengan membandingkan hasil pengujian terhadap data mekanik komposit kapal berbasis fiberglass dan laminated bamboo composite pada penelitian sebelumnya.

Berikut adalah perbandingan antara hasil pengujian kekuatan tekuk dari komposit bambu apus-fiberglass dengan penelitian sebelumnya.

Table 3. Perbandingan Uji Dampak Dengan BKI

Variasi Sudut	Kuat Dampak Hasil Uji (Mpa)	Standar Minimum BKI (Mpa)	Memenuhi Standar BKI?
0	108,06	100	Ya
8,7	110,60	100	Ya
17,10	127,63	100	Ya
24,77	138,90	100	Ya

Berdasarkan hasil pengujian dampak, diperoleh nilai kekuatan dampak komposit bambu apus-fiberglass pada variasi sudut 0°, 8,74°, 17,10°, dan 24,77° masing-masing sebesar 108,06 kJ/m², 110,60 kJ/m², 127,63 kJ/m², dan 138,90 kJ/m². Nilai tertinggi diperoleh pada spesimen dengan sudut lengkung 24,77°, sedangkan nilai terendah terdapat pada spesimen 0°.

Peningkatan kekuatan dampak pada spesimen dengan sudut lengkung yang lebih besar menunjukkan bahwa geometri lengkung mampu meningkatkan kemampuan material

dalam menyerap energi benturan. Bentuk lengkung menyebabkan distribusi tegangan yang lebih merata selama proses tumbukan sehingga konsentrasi tegangan lokal dapat berkurang. Selain itu, keberadaan lapisan fiberglass membantu menahan propagasi retak yang terjadi pada lapisan bambu sehingga energi yang diperlukan untuk menyebabkan kegagalan material menjadi lebih besar.

3.2. Uji Tekuk

Uji tekuk telah dilaksanakan menggunakan metode *Three Point Tekuk* seperti yang tertera pada tabel 2, dapat diringkas sebagai berikut:

Tabel 2. Data Uji Tekuk

Variasi Sudut	Rata-rata L (mm)	Rata-rata b (mm)	Rata-rata d (mm)	Rata-rata f (kN)	Kuat Tekuk (Mpa)
0	130	13	10	8,91	326,5
8,7	130	13	10	9,69	363,37
17,10	130	13	10	10,11	379
24,77	130	13	10	10,16	380,87

Data tabel 2 mengindikasikan bahwa nilai rata-rata kekuatan tekuk tertinggi ditemukan pada spesimen dengan sudut 24.77°, yaitu mencapai 380.87 MPa, sementara nilai rata-rata terkecil terukur pada sudut 0°, yang berada di angka 326.5 MPa. Hal ini dapat diamati dalam grafik pada gambar 10.

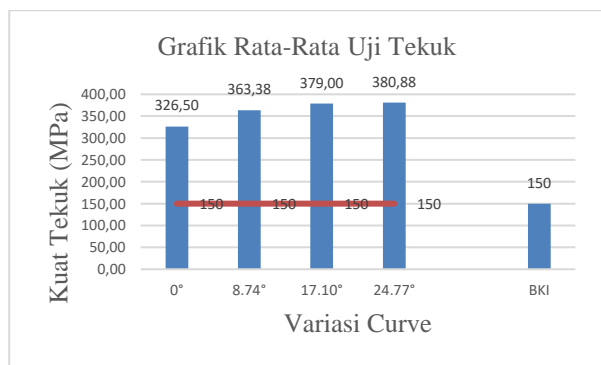


Figure 10. Grafik Uji Tekuk

Berikut adalah perbandingan antara hasil pengujian kekuatan tekuk dari komposit bambu apus-fiberglass dengan standar minimum BKI:

Table 4. Hasil Perbandingan Uji Tekuk Dengan BKI

Variasi Sudut	Kuat Tekuk Hasil Uji (Mpa)	Standar Minimum BKI (Mpa)	Memenuhi Standar BKI?
0	326,5	150	Ya
8,7	363,37	150	Ya
17,10	379	150	Ya
24,77	380,87	150	Ya

Dari tabel perbandingan di atas, terlihat jelas bahwa semua spesimen komposit bambu apus-fiberglass yang diuji, pada semua variasi sudut kelengkungan (0°, 8.7°, 17.10°, dan 24.77°), memiliki nilai kekuatan tekuk yang jauh di atas standar minimum BKI sebesar 150 MPa. Spesimen dengan sudut kelengkungan 24.77° menunjukkan kekuatan tekuk tertinggi sebesar 380.87 MPa, yang berarti lebih dari dua kali lipat standar minimum BKI. Hal ini mengindikasikan bahwa material komposit yang diteliti memiliki performa kekuatan tekuk yang sangat baik dan memenuhi persyaratan BKI untuk aplikasi pada kapal.

Meningkatnya kekuatan tekuk seiring bertambahnya sudut kelengkungan menunjukkan bahwa bentuk lengkung memberikan efek pengaku struktural terhadap spesimen. Pada saat menerima beban lentur, geometri lengkung mampu mendistribusikan beban secara lebih merata dan mengurangi konsentrasi tegangan pada bagian tengah spesimen. Kondisi ini menyebabkan spesimen dengan sudut 24.77° mampu menahan beban yang lebih tinggi dibandingkan spesimen datar.

3.3 Analisis Perbandingan Dengan Penelitian Sebelumnya

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan sudut lengkung dari spesimen memberikan dampak positif terhadap karakteristik mekanis komposit bambu apus-fiberglass. Nilai kekuatan impak naik dari 108,06 kJ/m² pada spesimen dengan sudut 0° menjadi 138,90 kJ/m² pada sudut 24,77°, yang berarti mengalami peningkatan sebesar 28,54%. Di sisi lain, kekuatan tekuk juga mengalami kenaikan dari 326,50 MPa menjadi 380,87 MPa atau meningkat sebesar 16,65%.

Hasil yang diperoleh sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Mohd. Hafiz Bin Baharuddin, di mana peningkatan sudut kelengkungan pada komposit yang terbuat dari bambu apus dan fiberglass menghasilkan perbaikan dalam sifat mekaniknya. Dalam

penelitian itu, tercatat kekuatan impak mencapai 111,61 kJ/m² dan kekuatan tekuk mencapai 382,50 MPa pada variasi sudut 24,77°.

Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, nilai kekuatan impak yang diperoleh dalam penelitian ini adalah 138,90 kJ/m², yang menunjukkan peningkatan sekitar 24,45%. Di sisi lain, nilai kekuatan tekuk yang mencapai 380,87 MPa menunjukkan hasil yang sebanding dengan penelitian yang lalu. Ini mengindikasikan bahwa penggunaan kombinasi laminasi bambu apus dan *fiberglass chopped strand mat* dengan teknik pembuatan yang diterapkan dapat menciptakan karakteristik mekanik yang kompetitif untuk penggunaan dalam struktur kapal.

Peningkatan dalam kekuatan mekanik pada spesimen dengan sudut kelengkungan yang lebih besar kemungkinan terjadi karena distribusi tegangan yang lebih merata selama proses pembebanan. Di samping itu, desain lengkung memfasilitasi interaksi antara lapisan bambu, *fiberglass*, dan resin *epoxy* yang lebih efektif dalam menahan energi impak serta beban lentur, sehingga meningkatkan ketahanan material terhadap deformasi dan kerusakan.

Secara keseluruhan, temuan dalam penelitian ini menunjukkan bahwa variasi sudut 24,77° adalah konfigurasi optimal karena menghasilkan nilai tertinggi untuk kekuatan impak dan kekuatan tekuk. Variasi ini memiliki potensi untuk diterapkan pada komponen struktur kapal yang memiliki bentuk melengkung, seperti gading-gading, bagian lambung, dan elemen struktur lainnya.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil evaluasi dan pengamatan yang telah dilakukan pada komposit laminasi bambu apus–*fiberglass* yang memiliki bentuk lengkung, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

Perubahan sudut kelengkungan memberikan dampak pada sifat mekanik dari komposit bambu apus–*fiberglass*. Semakin besar sudut kelengkungan yang diterapkan, semakin meningkat nilai kekuatan impak dan kekuatan tekuk yang tercatat.

Nilai kekuatan impak mengalami peningkatan dari 108,06 kJ/m² pada sudut 0° menjadi 138,90 kJ/m² pada sudut 24,77°, sementara itu kekuatan tekuk meningkat dari 326,50 MPa menjadi 380,87 MPa pada sudut yang sama.

Seluruh spesimen berhasil memenuhi standar minimum kekuatan tekuk yang ditetapkan BKI sebesar 150 MPa dengan rentang nilai pengujian antara 326,50 hingga 380,87 MPa.

Variasi sudut kelengkungan 24,77° merupakan opsi terbaik karena menghasilkan nilai kekuatan impak dan kekuatan tekuk paling tinggi, sehingga memiliki potensi untuk dijadikan bahan alternatif dalam struktur kapal yang berbentuk melengkung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Handayani, “ANALISIS PENGUJIAN STRUKTUR BALOK LAMINASI KAYU SENGON DAN KAYU KELAPA,” *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan*, vol. 18, no. 1, 2016, doi: 10.15294/jtsp.v18i1.6693.
- [2] N. N. Belatrix, Y. Arnandha, and D. Firmansyah, “Analisis Sifat Mekanik Lentur Papan Laminasi Kombinasi Bambu Petung dan Bambu Ater,” *Inersia*, vol. 18, no. 1, 2022, doi: 10.21831/inersia.v18i1.48260.
- [3] D. L. Zariatun, M. A. Ravizqi, and A. S. Siregar, “Analisis Pengaruh Waktu Perebusan Serat Bambu Apus (*Gigantochloa Apus*) Pada Larutan NaOH Terhadap Beban Tarik,” *Submission 23*, 2023.
- [4] I. G. P. A. Suryawan, N. Suardana, I. K. Suarsana, I. P. Lokantara, and I. K. J. Lagawa, “Kekuatan Tarik dan Lentur pada Material Komposit Berpenguat Serat Jelatang,” *Jurnal Energi Dan Manufaktur*, vol. 12, no. 1, 2019, doi: 10.24843/jem.2019.v12.i01.p02.
- [5] R. H. Setyanto, I. Priyadithama, and N. Maharani, “Pengaruh Faktor Jenis Kertas, Kerapatan dan Persentase Perekat Terhadap Kekuatan Bending Komposit Panel Serap Bunyi Berbahan Dasar Limbah Kertas dan Serabut Kelapa,” *PERFORMA: Media Ilmiah Teknik Industri*, vol. 10, no. 2, 2011.
- [6] T. Mutia, S. Sugesty, H. Hardiani, T. Kardiansyah, and H. Risdianto, “POTENSI SERAT DAN PULP BAMBUNYU UNTUK KOMPOSIT PEREDAM SUARA,” *JURNAL SELULOSA*, vol. 4, no. 01, 2016, doi: 10.25269/jssel.v4i01.54.
- [7] A. Purna Irawan and dan I. Wayan Sukania, “Kekuatan Tekan dan Flexural Material Komposit Serat Bambu Epoksi,” *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 14, no. 2, 2013.
- [8] W. Zhang, X. Zhang, Z. Qin, Y. Wu, W. Zhang, and R. Yang, “High-transparency polysilsesquioxane/glycidyl-azide-polymer resin and its fiberglass-reinforced composites with excellent fire resistance, mechanical properties, and water resistance,” *Compos B*

- Eng, vol. 219, 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.108913.
- [9] T. Tuswan *et al.*, "Correlation between lamina directions and the mechanical characteristics of laminated bamboo composite for ship structure," *Curved and Layered Structures*, vol. 10, no. 1, 2023, doi: 10.1515/cls-2022-0186.
- [10] A. A. Annaafi, I. Yasin, and M. A. Shulhan, "Analisis Kuat Lentur Balok Laminasi Lengkung dengan Perekat Epoxy," *AGREGAT*, vol. 4, no. 1, 2019, doi: 10.30651/ag.v4i1.2819.
- [11] N. Utami and E. Cahyo, "SIFAT MEKANIK KOMPOSIT FIBERGLASS MELALUI UJI LENTUR," *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, vol. 8, no. 2, 2022, doi: 10.56521/teknika.v8i2.798.
- [12] F. Lutfi, "Pembuatan Model Papan Selancar Komposit Serat Bambu Menggunakan Vacuum Bagging," *Tugas Akhir, Universitas Islam Indonesia Yogyakarta*, 2018.
- [13] W. Sujarwo, I. B. K. Arinasa, and I. N. Peneng, "POTENSI BAMBUN TALU (*Gigantochloa apus* J. A. & J. H. Schult .," *UPT Balai Konservasi Tumbuhan Kebun Raya "Eka Karya" Bali - LIPI*, vol. 21, no. 2, 2010.
- [14] P. Manik, H. Yudo, and F. A. Siahaan, "Pengaruh Susunan dan Ukuran Bilah Bambu Petung (*Dendrocalamus asper*) Dan Bambu Apus (*Gigantochloa apus*) Terhadap Kekuatan Tarik, Kekuatan Tekan Dan Kekuatan Lentur Untuk Komponen Konstruksi Kapal," *Kapal*, vol. 14, no. 3, 2017, doi: 10.14710/kpl.v14i3.16491.
- [15] A. Chandra and A. Asroni, "PENGARUH KOMPOSISI RESIN POLIYESTER TERHADAP KEKUATAN BENDING KOMPOSIT YANG DIPERKUAT SERAT BAMBUN APUS," *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, vol. 4, no. 2, 2017, doi: 10.24127/trb.v4i2.68.
- [16] P. Gunawan, "Pengaruh Jenis Perekat Terhadap Keruntuhan Lentur Balok Laminasi Galar Dan Bilah Vertikal Bambu Petung," *Media Teknik Sipil*, vol. 7, no. 1, 2009.
- [17] D. Istanta, "Analisis Pengaruh Texture Serat Terhadap Sifat Fisik Dan Mekanik Aramid Epoksi Prepreg," *Indept*, vol. 3, no. 1, 2013.
- [18] Hermawan, Dian W., et al. "Ketahanan Tekan Komposit Dari Resin Epoksi Berpenguat Serat Bambu." *Jurnal Fisika Unnes*, vol. 5, no. 1, 2015.
- [19] P. Manik, S. Samuel, T. Tuswan, S. Jokosisworo, and R. K. Nadapdap, "Mechanical properties of laminated bamboo composite as a sustainable green material for fishing vessel: Correlation of layer configuration in various mechanical tests," *J Mech Behav Mater*, vol. 31, no. 1, 2022, doi: 10.1515/jmbm-2022-0075.
- [20] P. Prima Tambunan, H. Yudo, P. Manik, and L. Pengelasan, "JURNAL TEKNIK PERKAPALAN Analisa Teknis Papan Laminasi Serat Bambu Petung Dengan Serat Fiberglass Woven Roving Untuk Material Kulit Kapal," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 10, no. 2, 2022.
- [21] "Mohd.Hafiz Bin Baharuddin, Prof. Dr. Parlindungan Manik S,T. M,T, Ir. Kiryanto M,T.," *Analisis Kombinasi Laminasi Serat Bambu Apus dengan Fiberglass (Chopped Strand Matt) Menggunakan Teknik Anyaman Dicitak Lengkung (Curve) untuk Material Kulit Kapal*, vol. 13, p. 9, 2025.