

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam melaksanakan pengujian telah diperoleh data uji impact sesuai dengan tahapan pengujian sebagai bahan analisa. Untuk melengkapi data ini, berikut hasil yang diperoleh sesuai dengan urutan pelaksanaan pengujian.

4.1 Pengukuran Dimensi Spesimen

Sebelum melakukan pengujian impact, seluruh spesimen komposit serat aramid dengan resin epoksi dilakukan pengukuran dimensi terlebih dahulu, menggunakan penggaris *stainless steel* dengan keterlitan 0,1 mm. Pengukuran dilakukan pada tiga titik berbeda dan diambil nilai rata-rata sebagai data dimensi spesimen yang digunakan dalam perhitungan kekuatan impact. Ketidakeragaman dimensi antar spesimen merupakan karakteristik yang umum terjadi pada fabrikasi metode *hand lay-up* secara manual material komposit, karena proses tersebut sangat bergantung pada konsistensi operator dalam proses laminasi dan *curing* (pengeringan).

Pada penelitian ini, pembuatan material komposit menggunakan serat aramid dengan resin epoksi, dengan menggunakan standar ASTM D6110 metode *Charpy* yang memiliki spesifikasi 55 x 10 x 10 mm. Hasil pengukuran dimensi seluruh spesimen dirangkum pada tabel berikut.

Tabel 4. 1 Pengukuran Dimensi Spesimen K-1

Unit (mm)	K-1. 1	K-1. 2	K-1. 3	Rata-rata
P	55,0	55,5	55,4	55,3
L	10,0	10,4	10,4	10,3
t	10,1	10,4	10,4	10,3

Tabel 4. 2 Pengukuran Dimensi Spesimen K-2

Unit (mm)	K-2. 1	K-2. 2	K-2. 3	Rata-rata
P	55,3	55,5	55,0	55,3
L	10,5	10,3	10,4	10,4
t	10,5	10,3	10,6	10,5

Tabel 4. 3 Pengukuran Dimensi Spesimen K-3

Unit (mm)	K-3. 1	K-3. 2	K-3. 3	Rata-rata
P	55,0	55,2	55,0	55,1
L	10,4	10,3	10,4	10,4
t	10,5	10,3	10,5	10,4

Berdasarkan ketiga tabel diatas memiliki perbedaan yang tidak terlalu signifikan terkait dengan dimensi spesimen. Perbedaa antar spesimen terjadi karena pada saat proses fabrikasi material dilakukan secara manual menggunakan metode *hand lay up* sehingga, faktor seperti kontrol ketebalan spesimen, penyusutan resin, proses spesime mengeras dan dikeluarkan dari cetakan, mengakibatkan hal seperti perbedaan dimensi spesimen dapat terjadi.

4.2 Pembahasan

Pengujian dampak dilaksanakan di Laboratorium Material Teknik, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro pada tanggal 28 April 2026 menggunakan mesin uji dampak pendulum *Charpy* (Shimadzu Seisakusho) dengan beban pendulum sebesar 26095 gram ($\pm 26,1$ kg), panjang lengan 0,75 m, dan diameter ayunan 0,635 m. Pengujian mengacu pada standar ASTM D6110-04 dengan penyesuaian dimensi spesimen akibat karakteristik material komposit serat aramid yang digunakan.

4.2.1 Hasil Pengujian Dampak *Charpy* ASTM D6110-04

Parameter yang diukur dan dihitung pada pengujian ini meliputi energi dampak yang terserap dan kekuatan dampak atau harga dampak, yang merupakan normalisasi energi dampak terhadap luas penampang patah spesimen. Perhitungan harga dampak dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$I_s = \frac{E}{A}$$

Keterangan:

I_s = Harga dampak (J/mm^2)

E = Energi dampak terserap (J)

A = Luas penampang patah (mm^2) = lebar x tinggi

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Impak Spesimen K-1

Spesimen	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Energi impak (Joule)	Harga impak (Joule/mm ²)	Luas penampang (mm ²)
K-1. 1	55,0	10,0	10,1	5,63	0,26	560,55
K-1. 2	55,5	10,4	10,4	5,58	0,22	577,2
K-1. 3	55,4	10,4	10,4	5,52	0,30	576,16

Pada spesimen K-1.1 (4 layer) didapatkan hasil dengan panjang 55 mm, lebar 10 mm dan tebal 10,1 mm yang menggunakan spesimen sesuai standar ASTM D6110 pada saat pengujian impak *charpy* mendapatkan nilai Energi Impak 5,63 Joule, Harga Impak 0,26 Joule/mm², dan Luas Penampang sebesar 560,55 mm².

1. Kekuatan Impak

$$\begin{aligned}\alpha_k &= \frac{E}{A} \\ &= \frac{5,63}{560,55} \\ &= 0,100 \text{ Joule/mm}^2\end{aligned}$$

Pada spesimen K-1. 2 (4 layer) didapatkan hasil dengan panjang 55,5 mm, lebar 10,4 mm, dan panjang 10,1 mm pada pengujian impak didapatkan hasil Energi Impak 5,58 Joule, Harga Impak 0,22 Joule/mm², dan Luas Penampang sebesar 577,2 mm² yang menggunakan spesimen sesuai standar ASTM D6110 pada pengujian impak *charpy*.

2. Kekuatan Impak

$$\alpha_k = \frac{E}{A}$$

$$= \frac{5,58}{577,2}$$
$$= 0,009 \text{ Joule/mm}^2$$

Sementara itu, pada spesimen K-1. 3 (4 layer) dengan panjang 55,4 mm, lebar 10,4 mm, dan tebal 10,4 mm didapatkan hasil Energi Impak sebesar 5,52 Joule, Harga Impak 0,30 Joule/mm², dan Luas Penampang 576,16 mm². Spesimen diuji sesuai dengan standar pengujian impak metode *charpy* standar ASTM D6110.

3. Kekuatan Impak

$$\begin{aligned}\alpha_k &= \frac{E}{A} \\ &= \frac{5,52}{576,16} \\ &= 0,009 \text{ Joule/mm}^2\end{aligned}$$

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Impak Spesimen K-2

Spesimen	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Energi impak (Joule)	Harga impak (Joule/mm ²)	Luas penampang (mm ²)
K-2. 1	55,3	10,5	10,5	5,21	0,20	580,65
K-2. 2	55,5	10,3	10,3	5,27	0,25	571,65
K-2. 3	55,0	10,4	10,6	5,46	0,28	583

Pada spesimen K-2.1 (5 layer) didapatkan hasil dengan panjang 55,3 mm, lebar 10,5 mm, dan tebal 10,5 mm pada saat pengujian impak *charpy* mendapatkan nilai Energi Impak 5,21 Joule, Harga Impak 0,20 Joule/mm², dan Luas Penampang sebesar 580,65 mm². Pengujian impak *charpy* dilakukan sesuai standar ASTM D6110.

4. Kekuatan Impak

$$\alpha_k = \frac{E}{A}$$

$$= \frac{5,21}{580,65}$$
$$= 0,008 \text{ Joule/mm}^2$$

Pada spesimen K-2.2 (5 layer) dengan panjang 55,5 mm, lebar 10,3 mm, dan tebal 10,3 mm didapatkan nilai Energi Impak sebesar 5,27 Joule, Harga Impak 0,25 Joule/mm², dan Luas Penampang 571,65 mm². Pengujian impak *charpy* menggunakan standar uji sesuai ASTM D6110.

5. Kekuatan Impak

$$\begin{aligned} \alpha_k &= \frac{E}{A} \\ &= \frac{5,27}{571,65} \\ &= 0,009 \text{ Joule/mm}^2 \end{aligned}$$

Sementara itu, pada spesimen K-2.3 memiliki dimensi spesimen sebesar 55 mm untuk panjang, lebar 10,4, dan tebal sebesar 10,6 mm mendapatkan Energi Impak yakni 5,46 Joule, Harga Impak sebesar 0,28 Joule/mm², dan Luas Penampang sebesar 583 mm². Pengujian impak *charpy* menggunakan standar uji ASTM D6110.

6. Kekuatan Impak

$$\begin{aligned} \alpha_k &= \frac{E}{A} \\ &= \frac{5,46}{583} \\ &= 0,009 \text{ Joule/mm}^2 \end{aligned}$$

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Impak Spesimen K-3

Spesimen	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Energi impak (Joule)	Harga impak (Joule/mm ²)	Luas penampang (mm ²)
K-3. 1	55,0	10,0	10,1	5,21	0,20	555,5
K-3. 2	55,5	10,4	10,4	5,27	0,25	577,2

K-3. 3	55,4	10,4	10,4	5,46	0,28	576,16
--------	------	------	------	------	------	--------

Pada spesimen K-3.1 (6 *layer*) didapatkan hasil dengan panjang 55 mm, lebar 10 mm, dan tebal 10,1 mm pada pengujian impak metode *charpy* ASTM D6110 mendapatkan nilai Energi Impak sebesar 5,21 Joule, Harga Impak sebesar 0,20 Joule/mm², dan Luas Penampang 555,5 mm².

7. Kekuatan Impak

$$\begin{aligned}
 \alpha_k &= \frac{E}{A} \\
 &= \frac{5,21}{555,5} \\
 &= 0,009 \text{ Joule/mm}^2
 \end{aligned}$$

Spesimen K-3.2 (6 layer) dengan panjang 55,5 mm, lebar 10,4 mm, dan tinggi 10,4 mm, didapatkan hasil Energi Impak 5,21 Joule, Harga Impak 0,20 Joule/mm², dan Luas Penampang sebesar 577,2 mm². Pengujian impact *charpy* ini menggunakan standar ASTM D6110.

8. Kekuatan Impak

$$\begin{aligned}\alpha_k &= \frac{E}{A} \\ &= \frac{5,27}{577,2} \\ &= 0,009 \text{ Joule/mm}^2\end{aligned}$$

Spesimen K-3.3 (6 layer) dengan panjang 55,4 mm, lebar 10,4 mm, dan tebal 10,4 mm, maka didapatkan hasil Energi Impak 5,46 Joule, Harga Impak sebesar 0,28 Joule/mm², dan Luas Penampang sebesar 576,16 mm². Pengujian impact ini menggunakan metode *charpy* dengan standar ASTM D6110.

9. Kekuatan Impak

$$\begin{aligned}\alpha_k &= \frac{E}{A} \\ &= \frac{5,46}{576,16} \\ &= 0,009 \text{ Joule/mm}^2\end{aligned}$$

4.2.2 Analisa Visual Kerusakan Material Komposit Serat Aramid

Pada sub-bab ini membahas mengenai hasil pengujian Impact *Charpy* terhadap spesimen komposit serat aramid dan resin epoksi dengan memberikan pengujian pada tiap-tiap spesimen. Pengujian ini dilakukan menggunakan mesin Shimadzu Seisakusho dengan metode *charpy* di Laboratorium Material Teknik Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Diponegoro.

1. Spesimen Uji K-1



Gambar 4. 2 Spesimen Uji K-1
Sebelum Pengujian



Gambar 4. 1 Spesimen Uji K-1
Setelah Pengujian

Secara visual, ketiga spesimen uji k-1 menunjukkan pola kegagalan kompleks antara lain:

- Delaminasi, pada ketiga spesimen tersebut terlihat jelas antar lapisan pada area sekitar patahan terdapat pemisahan antar lapisan atau delaminasi. Hal tersebut menunjukkan saat energi impact diserap oleh material melalui mekanisme kegagalan interlaminar, karena spesimen memiliki tegangan geser yang dapat timbul saat benturan dari pendulum mesin impact. Oleh karena itu, dapat menyebabkan ikatan antar lapisan terlepas sebelum serat putus total.
- *Fiber pull-out*, pada spesimen uji k-1 terlihat serat-serat terurai dan mencuat keluar. Hal ini dapat mengindikasikan terjadinya mekanisme *fiber pull-out*, dimana serat terlepas dari matriks sebelum akhirnya putus akibat pengujian impact *charpy*.
- *Fracture surface*, hal ini terlihat pada spesimen uji k-1.1 dan k-1.2, terlihat pola anyaman serat yang menunjukkan bahwa arah serat sangat mempengaruhi jalur perambatan kerusakan (retak).

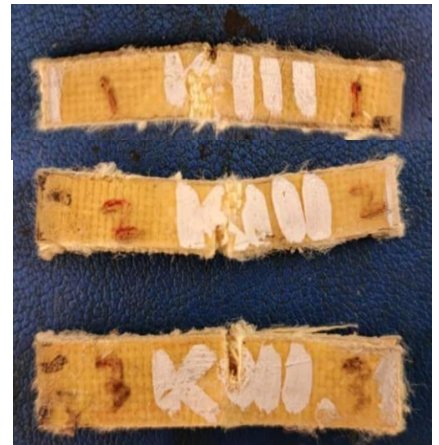
Berdasarkan kerusakan secara fisik dari spesimen uji k-1 setelah dilakukannya pengujian impact *charpy* sesuai standar ASTM D6110, ketiga spesimen mengalami *hinge break/complete break*. Spesimen tersebut

mengalami hampir patah total namun menyisakan sedikit kaitan pada serat atau hanya tertekuk secara ekstrem. Namun, melihat deformasi "V" secara tajam, spesimen ini menyerap energi yang cukup besar sebelum mencapai titik gagal. Pada spesimen uji k-1 juga terdapat lengkungan permanen pada spesimen. Hal ini menandakan material komposit memiliki tingkat keuletan dan tidak bersifat getas murni. Hasil pengujian dari ketiga sampel spesimen uji k-1 (k-1. 1, k-1. 2, dan k-1. 3) menunjukkan pola patahan yang konsisten. Area kerusakan terpusat pada titik tengah (lokasi takikan/*notch*). Selain itu, ukuran daerah kerusakan (*damage zone*) pada ketiga spesimen uji relatif serupa, hal ini menandakan bahwa variasi 4 *layer* memberikan respon mekanis yang stabil terhadap beban impact. Melalui hasil analisis fisik terkait kerusakan yang terjadi pada material komposit serat aramid 4 *layer* dapat disimpulkan bahwa material tersebut memiliki ketangguhan impact (*impact toughness*) yang baik, dibuktikan dari banyaknya energi yang diserap melalui mekanisme delaminasi dan *fiber pull-out*. Kegagalan juga tidak terjadi secara tiba-tiba (*catastrophic*), akan tetapi melalui proses kerusakan secara bertahap pada struktur serat dan matriksnya. Hal tersebut, juga berarti material komposit serat aramid memiliki keuletan yang baik dan bukan jenis material komposit yang getas.

2. Spesimen Uji K- 2



Gambar 4. 4 Spesimen Uji K-2
Sebelum Pengujian



Gambar 4. 3 Spesimen Uji K-2
Setelah Pengujian

Secara visual, ketiga spesimen uji k-2 menunjukkan pola kegagalan kompleks antara lain:

- Delaminasi *multi interface*, pada material komposit spesimen uji k-2 ini, terlihat adanya pemisahan antar lapisan penyusunnya. Spesimen 5 *layer* ini, terdapat 4 lapisan antarmuka (*interfaces*) antar bidang sentuh yang berpotensi menyerap energi melalui perambatan retak antar lapisan. Retakan horizontal yang memanjang menjauh takikan menunjukkan energi mekanik didistribusikan secara lateral atau penyebaran beban ke arah samping atau sejajar dengan lapisan material.
- *Fiber pull-out* dan *fraying*, ujung-ujung serat yang mencuat menunjukkan bahwa ikatan antara serat dan matriks terlepas sebelum serat tersebut putus sepenuhnya. Hal ini menjelaskan bahwa material memiliki ketangguhan yang baik karena proses pencabutan serat memakan energi yang besar.
- *Partial/hinge break*, spesimen uji k-2 tidak mengalami patah getas yang bersih (*clean break*). Namun, spesimen menunjukkan perilaku *hinge break*, pada bagian spesimen yang masih terhubung oleh serta-serat yang belum putus total disisi yang mengalami tegangan tarik.

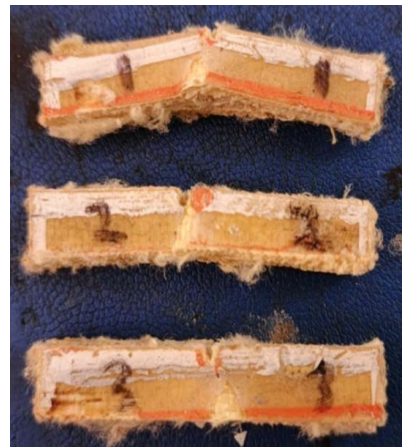
Penambahan jumlah *layer* menjadi 5 memberikan hasil uji yakni lebih kuat dan secara teoritis meningkatkan momen inersia penampang. Hal ini terlihat pada deformasi tekuk yang terjadi, spesimen mampu menahan beban dampak lebih lama sebelum struktur utama gagal. Pengujian dampak *charpy* dengan standar ASTM D6110 yang dilakukan menghasilkan area kerusakan (*damage zone*) tampak terlokalisasi di sekitar takikan (*notch*), namun sebaran delaminasi cukup luas ke arah memanjang spesimen. Hal ini, menunjukkan efisiensi struktur 5 *layer* dalam meredam beban kejut. Spesimen K-2.1 dan K-2.2 menunjukkan pola patahan yang hampir sama dengan sudut tekuk yang besar. Oleh karena itu, hal tersebut menandakan proses manufaktur cukup seragam. Pada spesimen uji K-2.3 terlihat memiliki robekan serat yang sedikit lebih berantakan di bagian bawah, yang mengindikasikan adanya variasi kecil dalam orientasi serat pada lapisan paling luar. Berdasarkan pengujian yang sudah dilakukan, ketiga spesimen uji K-2 memiliki sisa tekukan (deformasi permanen) setelah pendulum. Maka dari itu, dapat menandakan material memiliki karakter *semi ductile* hingga *tough*. Secara visual, banyak serat yang terurai dan luas area

delaminasi berkolerasi langsung pada tingginya nilai kekuatan impak (*impact strength*). Hal tersebut dapat disimpulkan bahwa material komposit 5 layer menunjukkan ketahanan impak yang tinggi. Kegagalan di dominasi oleh mekanisme penyerapan energi berupa delaminasi antar lapisan dan *fiber pull out* yang mencegah material pecah secara mendada atau hancur berkeping-keping.

3. Spesimen Uji K-3



Gambar 4. 5 Spesimen K-3
Sebelum Pengujian



Gambar 4. 6 Spesimen K-3
Setelah Pengujian

Secara visual, ketiga spesimen uji k-3 menunjukkan pola kegagalan kompleks antara lain:

- Delaminasi ekstensif/*multi layer cracking*, terlihat jalur retakan horizontal yang sangat jelas dan berlapis-lapis. Energi dari pendulum terdistribusi ke lebih banyak bidang geser, sehingga dapat menyebabkan pemisahan antar layer yang merata dari atas ke bawah.
- *Fiber pull out*, terlihat banyak sekali serat yang mencuat dan terurai (*fraying*). Hal ini menunjukkan bahwa energi impak sangat besar sehingga memaksa banyak serat untuk terlepas dari ikatan resinnya (matriks) sebelum akhirnya putus.
- *Hinge break*/patah engsel, spesimen K-3 tampak tidak terpisah menjadi dua bagian yang benar-benar lepas. Akan tetapi, spesimen tersebut membentul engsel di area takikan (*notch*). Hal ini umum terjadi pada komposit dengan jumlag layer yang tinggi, di mana

lapisan-lapisan tengah dan belakang dapat menahan struktur meskipun lapisan depan sudah gagal total.

Berdasarkan analisis visual kegagalan dari material komposit serat aramid spesimen uji K-3 dengan pengujian impak *charpy* standar ASTM D6110. Spesimen K-3 (6 *layer*) terlihat lebih kaku, dibandingkan dengan spesimen variasi lapisan yang lain (4 *layer* dan 5 *layer*) yang dapat melengkung dan lebih elastis. Spesimen 6 *layer* ini cenderung mengalami kerusakan internal (delaminasi) yang lebih parah karena struktur lebih tebal dan menahan defleksi atau penyimpangan suatu elemen dari posisi asalnya akibat dikenakan dengan gaya. Area yang mengalami *stres* mekanik tinggi menyebar lebih jauh dari titik pusat hantaman (*notch*). Hal ini menandakan efisiensi material dalam mentransfer energi ke seluruh volume spesimen. Hasil analisa dari ketiga spesimen (K-3.1, K-3.2, dan K-3.3) menunjukkan pola kegagalan yang seragam, sehingga menandakan kualitas laminasi manual *hand lay up* atau proses manufaktur stabil. Meskipun mengalami kerusakan berat, spesimen tetap menjaga integritas bentuknya (tidak hancur). Hal ini adalah karakteristik utama komposit yang dirancang untuk keamanan tidak *brittle*/getas. Berdasarkan analisis visual yang ditemukan baik itu secara faktor kegagalan akibat dari pengujian impak *charpy* maupun hasil temuan visual lainnya, variasi 6 *layer* memiliki kemungkinan besar menghasilkan nilai kekuatan impak atau *impact strength* tertinggi dibandingkan dengan variasi 4 *layer* dan 5 *layer*. Secara visual, banyak serat yang tercabut dan luas area delaminasi menjadi bukti fisik bahwa material dapat bekerja secara keras dalam menyerap energi impak dari pendulum mesin *charpy*.

4.2.3 Mean Impact Strength Spesimen Uji

Berdasarkan hasil pengujian impak *charpy* yang telah dilakukan terhadap 9 spesimen komposit serat aramid, diperoleh nilai energi impak dan harga impak yang kemudian dikonversi menjadi nilai kekuatan impak (*impact strength*). Nilai rata-rata kekuatan impak (*mean impact strength*) dari seluruh sampel dihitung untuk mendapatkan representasi ketangguhan material pada setiap variasi lapisan (4 *layer*, 5 *layer*, dan 6 *layer*). *Mean impact strength* dilakukan untuk memastikan validitas data penelitian yang telah dilakukan, tanpa diketahui nilai rata-rata kekuatan impak maka, akan kesulitan

membandingkan efektivitas antara variasi lapisan. Perhitungan *mean impact strength* dilakukan untuk mendapatkan nilai representatif dari tiap-tiap variasi spesimen dan untuk mereduksi atau mengurangi dampak anomali data yang mungkin akan muncul akibat ketidaksamaan distribusi matriks pada saat proses fabrikasi manual

HASIL PENGUJIAN IMPAK CHARPY – ASTM D6110

Material Komposit Serat Aramid – Uji Kekuatan Impak Charpy

Spesimen	Variasi (Layer)	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Luas Penampang (mm ²)	Energi Impak (Joule)	Harga Impak (Joule/mm ²)	Kekuatan Impak (Joule/mm ²)	Keterangan
K-1.1	4 Layer	55	10	10.1	560.55	5.63	0.26	0.010	Spesimen K-1.1 (4 Layer)
K-1.2	4 Layer	55.5	10.4	10.4	577.2	5.58	0.22	0.010	Spesimen K-1.2 (4 Layer)
K-1.3	4 Layer	55.4	10.4	10.4	576.16	5.52	0.3	0.010	Spesimen K-1.3 (4 Layer)
K-2.1	5 Layer	55.3	10.5	10.5	580.65	5.21	0.2	0.009	Spesimen K-2.1 (5 Layer)
K-2.2	5 Layer	55.5	10.3	10.3	571.65	5.27	0.25	0.009	Spesimen K-2.2 (5 Layer)
K-2.3	5 Layer	55	10.4	10.6	583	5.46	0.28	0.009	Spesimen K-2.3 (5 Layer)
K-3.1	6 Layer	55	10	10.1	555.5	5.21	0.2	0.009	Spesimen K-3.1 (6 Layer)
K-3.2	6 Layer	55.5	10.4	10.4	577.2	5.27	0.25	0.009	Spesimen K-3.2 (6 Layer)
K-3.3	6 Layer	55.4	10.4	10.4	576.16	5.46	0.28	0.009	Spesimen K-3.3 (6 Layer)
Mean K-1 (4 Layer)		55.30	10.27	10.30	571.30	5.58	0.26	0.01	
Mean K-2 (5 Layer)		55.27	10.40	10.47	578.43	5.31	0.24	0.01	
Mean K-3 (6 Layer)		55.30	10.27	10.30	569.62	5.31	0.24	0.01	
Mean Keseluruhan		55.29	10.31	10.36	573.12	5.40	0.25	0.01	

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Impak *Charpy* ASTM D6110

menggunakan metode *hand lay-up*. Berikut disajikan data terkait dengan ringkasan data dan *mean impact strength*:

Berdasarkan data rekap hasil pengujian impak *charpy* tersebut diperoleh nilai *Mean* keseluruhan untuk harga impak sebesar $0,25 \text{ J/mm}^2$ dengan kekuatan impak rata-rata sebesar $0,01 \text{ Joule/mm}^2$. Hal tersebut menunjukkan karakteristik penyerapan energi yang cukup stabil pada material komposit serat aramid yang difabrikasi, meskipun terdapat variasi pada jumlah lapisan (*layer*). Jika ditinjau dari variasi jumlah lapisan, spesimen 4 *layer* (*Mean* K-1) mencatat harga impak rata-rata tertinggi yaitu sebesar $0,26 \text{ J/mm}^2$, dibandingkan dengan variasi 5 *layer* dan 6 *layer* yang memiliki nilai rata-rata sebesar $0,24 \text{ J/mm}^2$. Nilai kekuatan impak rata-rata pada ketiga variasi tersebut menunjukkan angka yang konsisten pada nilai $0,01 \text{ J/mm}^2$.

Meskipun demikian, luas penampang rata-rata pada variasi 5 *layer* adalah yang paling besar ($578,43 \text{ mm}^2$). Hal tersebut, menandakan luas penampang yang besar tidak serta merta meningkatkan harga impak secara signifikan. Pada pengujian impak *charpy* yang telah dilakukan, efisiensi penyerapan energi per satuan luas justru ditemukan lebih optimal pada konfigurasi 4 lapisan.

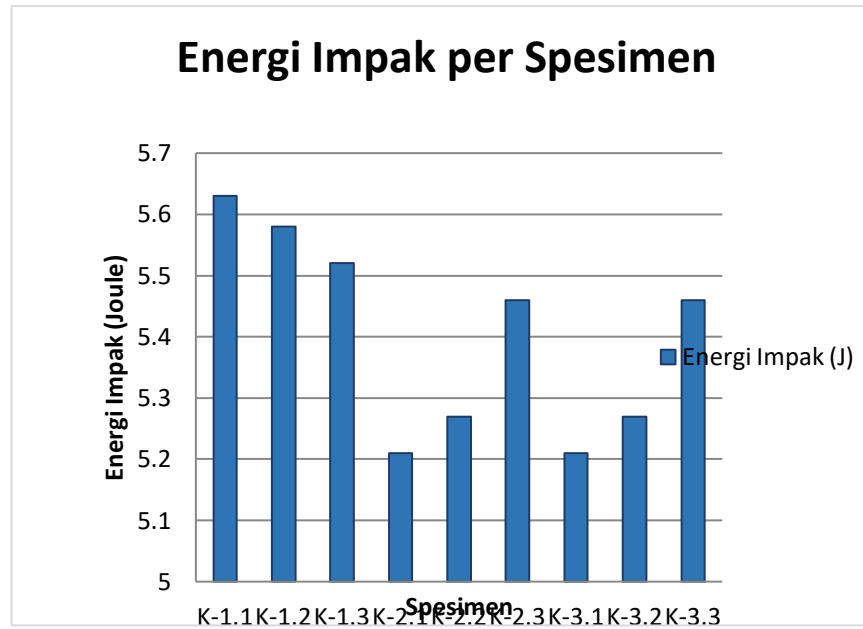
Konsistensi nilai kekuatan impak pada angka $0,01 \text{ J/mm}^2$ untuk seluruh *mean* (K-1, K-2, K-3) menunjukkan bahwa proses fabrikasi menggunakan metode *hand lay up* yang dilakukan dengan cukup baik, menghasilkan distribusi resin dan serat yang homogen sehingga kemampuan material dalam menahan beban impak bersifat seragam pada tiap variasi.

4.2.4 Grafik Hasil Pengujian Impak *Charpy*

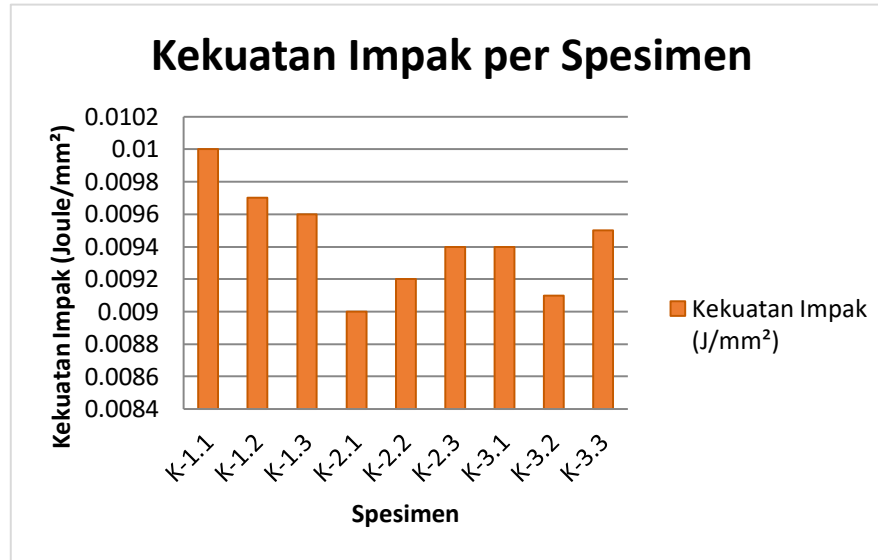
Penjelasan grafik dilakukan untuk menyajikan tren data hasil dari pengujian impak *charpy* dan juga dilakukan deskripsi temuan dari grafik yang disajikan agar pembaca mudah dalam memahami visual. Grafik dibuat berdasarkan data tabel yang dimiliki dengan menunjukkan perbandingan energi impak dan harga impak pada tiap variasi lapisan yang dibuat (4 *layer*, 5 *layer*, dan 6 *layer*). Berikut penyajian grafik hasil pengujian impak *charpy*:

Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Impak *Charpy*

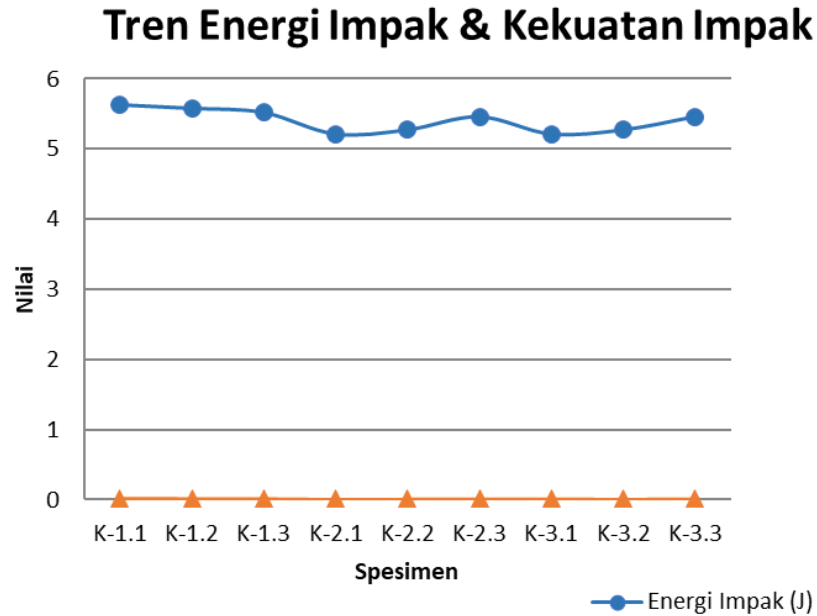
Kekuatan Impak (J/mm²)	Harga Impak (J/mm²)
0.01	0.26
0.0097	0.22
0.0096	0.3
0.009	0.2
0.0092	0.25
0.0094	0.28
0.0094	0.2
0.0091	0.25
0.0095	0.28



Gambar 4. 7 Grafik Energi Impak per Spesimen



Gambar 4. 8 Grafik Kekuatan Impak per Spesimen



Gambar 4. 9 Grafik Tren Energi Impak dan Kekuatan Impak

Berdasarkan grafik energi impact (*Bar Chart* Energi Impact) menunjukkan jumlah energi dalam Joule yang mampu disreap oleh material sebelum mengalami patahan total. Energi impact tertinggi ditemukan pada kelompok K-1 (4 *layer*), dengan puncaknya pada spesimen K-1. 1 sebesar 5,63 Joule. Pada grafik garism terlihat tren energi impact mengalami penurunan saat berpndah dari 4 *layer* ke 5 *layer*, kemudian cenderung stabil atau mendatar pada variasi 5 dan 6 *layer*. Hal tersebut, menunjukkan bahwa

penambahan lapisan serat aramid dari 4 ke 5 atau 6 *layer* tidak secara otomatis meningkatkan total energi yang diserap. Ada kemungkinan pada 4 *layer*, rasio antara serat dan resin epoksi berada pada titik paling ideal (*optimum fiber to matrix ratio*), sehingga proses penyerapan energi melalui mekanisme *elastic deformation* dan *fiber breakage* berlangsung lebih maksimal.

Grafik kekuatan impak (*Bar Chart* Kekuatan Impak) yang disajikan sudah dinormalisasi terhadap luas penampang spesimen. Pada grafik tersebut terjadi tren penurunan yang jelas pada kekuatan impak dari K-1 (4 *layer*) ke kelompok K-2 (5 *layer*) dan K-3 (6 *layer*). Nilai tertinggi ada pada K-1.1 yakni 0,01 J/mm². Dalam komposit penambahan lapisan mengalami peningkatan ketebalan dan luas penampang. Jika kenaikan energi impak tidak sebanding dengan kenaikan luas penampang, maka nilai kekuatan impak akan menurun. Pada grafik *orange*, terlihat kelompok K-1 lebih tinggi dibandingkan variasi lain. Hal tersebut, mengindikasikan bahwa pada spesimen yang lebih tebal (5 *layer* dan 6 *layer*), resiko adanya *void* (gelembung udara) atau penetrasi resin yang kurang sempurna ke serat bagian tengah menjadi lebih besar, sehingga menurunkan efisiensi kekuatan per satuan luas.

Pada grafik tren energi impak dan kekuatan impak menunjukkan jarak yang lebar antara garis biru (energi impak) dan garis *orange* (kekuatan impak). Garis *orange* terlihat hampir datar di angka mendekati 0 (nol). Hal tersebut, secara visual menegaskan bahwa nilai kekuatan impak spesimen sangat kecil dibandingkan dengan total energi yang diserap. Meskipun terdapat fluktuasi atau peningkatan pada kedua garis yang bergerak secara searah (paralel). Akan tetapi, setiap kenaikan energi pada spesimen tertentu seperti pada K-2,3 atau K-3.3 diikuti oleh kenaikan kekuatan impak. Oleh karena itu, hal tersebut membuktikan bahwa data memiliki validitas internal yang baik.

Secara keseluruhan, tren data menunjukkan bahwa komposit serat aramid dengan konfigurasi 4 *layer* memiliki performa terbaik dari segi total energi serap maupun kekuatan impak per satuan luas. Penurunan harga impak pada variasi 5 *layer* dan 6 *layer* disebabkan oleh bertambahnya luas penampang spesimen yang tidak diimbangi dengan peningkatan kemampuan serap energi secara signifikan. Oleh karena itu, dapat diindikasikan bahwa adanya batas saturasi jumlah lapisan dalam metode *hand lay up*, di mana penambahan lapisan

serat justru berpotensi meningkatkan cacat makro di dalam struktur komposit yang dapat menghambat distribusi beban impact.

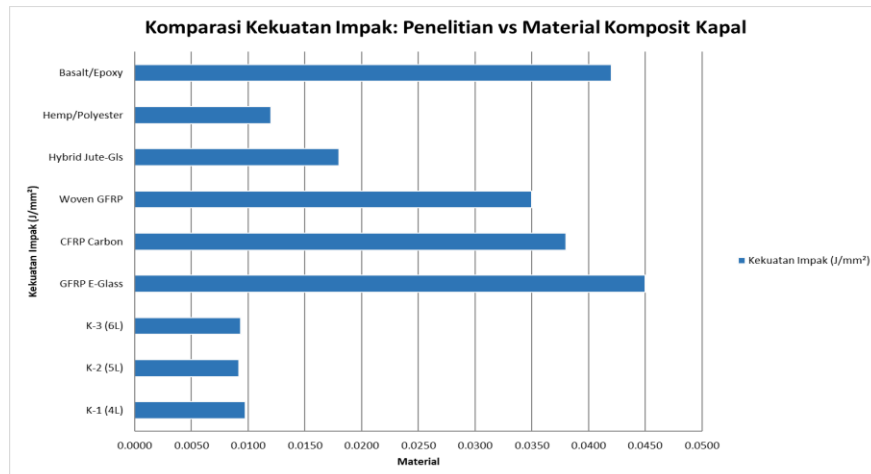
4.2.5 Komparasi Kekuatan Impact Material Komposit Lambung Kapal

Kekuatan impact merupakan parameter kritis dalam pemilihan material lambung kapal karena pada saat beroperasi lambung kapal rentan terhadap beban impact (*dynamic loading*). Penggunaan serat aramid (kevlar) 1000D dalam penelitian ini untuk mengevaluasi sejauh mana jumlah lapisan dapat meningkatkan sifat mekanis lambung kapal terhadap benturan yang terjadi saat beroperasi di perairan. Kemudian kekuatan impact dari material komposit serat aramid yang sudah dilakukan penelitian melalui pengujian impact *charpy* kemudian di komparasi atau di bandingkan dengan material komposit yang umum digunakan pada lambung kapal, untuk menganalisa hasil dari pengujian impact yang dilakukan. Berikut data komparasi yang ditemukan:

Tabel 4. 8 Data Komparasi Material Komposit

Material	Matriks	Penguat	Jumlah Layer	Kekuatan Impact (J/mm ²)	Status
Spesimen K-1 (4L) [Penelitian ini]	Epoxy	Serat Alam	4	0.0098	Uji Lab
Spesimen K-2 (5L) [Penelitian ini]	Epoxy	Serat Alam	5	0.0092	Uji Lab
Spesimen K-3 (6L) [Penelitian ini]	Epoxy	Serat Alam	6	0.0093	Uji Lab
GFRP (E-Glass/Epoxy)	Epoxy	E-Glass Fiber	8–12	0.045	Komersial
CFRP (Carbon/Epoxy)	Epoxy	Carbon Fiber	8–16	0.038	Premium
Woven Roving GFRP	Polyester	Woven Glass	6–10	0.035	Industri
Hybrid Jute-Glass/Epoxy	Epoxy	Jute + Glass	6–8	0.018	Riset
Hemp/Polyester	Polyester	Hemp Fiber	6	0.012	Riset
Basalt/Epoxy	Epoxy	Basalt Fiber	8	0.042	Emerging

Tabel tersebut membandingkan performa spesimen hasil penelitian material komposit serat aramid dengan variasi lapisan, pada penelitian ini disebutkan variasi lapisan tersebut dengan (K-1, K-2, dan K-3) dengan berbagai material komposit yang umum digunakan pada industri perkapalan dan otomotif. Data komparasi menunjukkan bahwa material sintetis memiliki keunggulan kekuatan yang signifikan. Kekuatan impact GFRP (*Glass Fiber*) dan CRFP (*Carbon Fiber*) memiliki kekuatan impact sebesar 0,045 J/mm² dan 0,038 J/mm². Maka dari itu, material sintetis memiliki struktur serat yang lebih homogen dan ikata *interfacial* yang kuat dibanding dengan serat alam, sehingga energi yang diserap saat tumbukan jauh lebih besar. *Hybrid Jute-Glass/Epoxy* memiliki nilai yang jauh lebih baik, hal tersebut wajar terjadi karena adanya campuran *fiber glass* yang mendogkrang kekuatan. *Hemp/polyester* juga memiliki nilai yang lebih baik, hal tersebut dipengaruhi oleh jenis serat alam yang digunakan, densitas serat (GSM), dan metode fabrikasi. Oleh karena itu,



Gambar 4. 10 Grafik Komparasi Kekuatan Impact Material Komposit

walaupun secara angka lebih rendah dibanding dengan GFRP (standar umum kapal), komposit serat aramid dengan resin epoksi menunjukkan potensi sebagai material lain. Selain itu, untuk di aplikasikan pada lambung kapal, melalui data ini menyarankan perlunya optimalisasi lebih lanjut, seperti peningkatan jumlah lapisan atau penggunaan teknik hibrida (pencampuran serat alami dan serat sintetis).

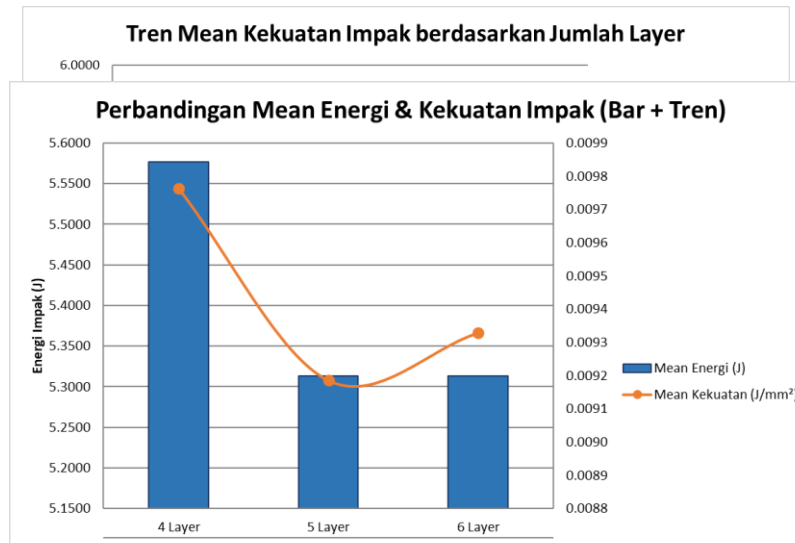
Perlu dicatat bahwa perbandingan kekuatan impak pada tabel tersebut bersifat indikatif dan tidak sepenuhnya sama, mengingat adanya perbedaan standar pengujian yang digunakan, jumlah lapisan yang tidak selalu setara, kondisi dan metode fabrikasi yang berbeda, serta dimensi spesimen yang mungkin tidak identik. Komparasi ini bertujuan untuk memberikan gambaran posisi relatif material komposit serat aramid terhadap material yang umum digunakan dalam industri perkapalan, bukan untuk mengklaim kesetaraan kondisi pengujian secara langsung.

4.2.6 Analisa Tren Kekuatan Impak berdasarkan Jumlah *Layer*

Analisa terhadap tren kekuatan impak bertujuan untuk memetakan pengaruh penambahan jumlah lapisan (*layer*) terhadap kemampuan material komposit dalam menyerap beban impak. Melalui perbandingan antara spesimen 4 *layer*, 5 *layer*, dan 6 *layer*, agar dapat diidentifikasi sejauh mana peningkatan massa serat berkontribusi secara linear terhadap ketangguhan mekanis material tersebut. Berikut analisa tren kekuatan impak berdasarkan jumlah layer yang disajikan dalam data kuantitatif dan grafik pendukung:

Tabel 4. 9 Data Tren Kekuatan Impak per Variasi Spesimen

Variasi Layer	Mean Energi Impak (J)	Mean Kekuatan Impak (J/mm ²)	Mean Harga Impak (J/mm ²)	Δ Energi vs K-1 (%)	Δ Kekuatan vs K-1 (%)
K-1 (4 Layer)	5.5767	0.0098	0.2600	-	-
K-2 (5 Layer)	5.3133	0.0092	0.2433	-4.72	-5.92
K-3 (6 Layer)	5.3133	0.0093	0.2433	-4.72	-4.46



Gambar 4. 12 Tren Mean Kekuatan Impak berdasarkan Jumlah *Layer*

Gambar 4. 11 Perbandingan Mean Energi dan Kekuatan Impak

Berdasarkan data tabel dan rekap grafik tren energi impact menunjukkan total daya serap spesimen terhadap beban impact yang diberikan pendulum. Terjadi penurunan kemampuan serap energi sebesar 4,72% ketika lapisan ditambah dari 4 menjadi 5 atau 6. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan lapisan serat aramid pada pengujian ini memberikan kontribusi linear terhadap peningkatan total energi serap, melainkan mengalami sedikit penurunan efisiensi. Pada 6 layer (k-3), meskipun energinya sama dengan 5 layer (k-2), kekuatan impactnya sedikit lebih bagus 0,0093 J/mm² hanya turun 4,46% dari 4 layer (k-1). Hal ini dipengaruhi oleh luas penampang rata-rata 6 layer (k-3) sedikit lebih kecil dan padat dibanding dengan 5 layer (k-2). Pada metode *hand lay up*, resin epoksi lebih mudah membasahi 4 layer secara merata. Ikatan antar-muka (*interfacial bonding*) yang kuat antara serat aramid dan matriks epoksi memungkinkan distribusi beban impact lebih merata. Spesimen 4 layer menghasilkan harga impact tertinggi sebesar 0,26 J/mm² dengan penggunaan material yang lebih sedikit, menjadikan pilihan yang paling efisien bagi aplikasi lambung kapal. Penambahan layer menjadi 5 dan 6 meningkatkan hambatan bagi resin untuk masuk ke serat bagian tengah. Hal ini berpotensi memicu munculnya *micro voids* (gelembung udara kecil). Spesimen yang lebih tebal cenderung mengalami kegagalan berupa pemisahan lapisan (*delamination*) lebih awal saat terkena benturan, yang menyerap energi lebih sedikit dibanding dengan mekanisme patahan serat (*fiber breakage*) yang sempurna pada spesimen tipis.

Oleh karena itu, berdasarkan analisis terhadap parameter K-1, dapat disimpulkan bahwa optimalisasi kekuatan impact pada komposit serat aramid tercapai pada konfigurasi 4 layer. Penurunan harga impact sebesar 5,92% pada 5 layer (K-2) dan 4,46% pada 6 layer (K-3) membuktikan bahwa penambahan dimensi ketebalan tanpa diikuti dengan peningkatan kualitas ikatan matriks dan serat, maka hanya akan mereduksi ketangguhan spesifik material. Maka dari itu, untuk aplikasi lambung kapal variasi 4 layer direkomendasikan karena memberikan efisiensi penyerapan energi persatuan luas yang paling maksimal.