

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Fabrikasi Spesimen

Proses fabrikasi spesimen komposit hybrid pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode *hand lay-up* dengan kombinasi serat aramid dan serat daun nanas (PALF) berbasis resin. Fabrikasi dilakukan secara manual melalui tahapan penyusunan laminasi, impregnasi resin, proses penekanan laminasi, dan curing sehingga terbentuk panel komposit yang kaku dan siap dipotong menjadi spesimen pengujian.



Gambar 4. 1 Hasil Fabrikasi Spesimen
(Sumber: Penulis, 2026)

Pembuatan spesimen dilakukan dengan mengacu pada standar pengujian bending komposit ISO 14125 yang digunakan sebagai acuan dimensi spesimen dan prosedur pengujian lentur material komposit berbasis polimer.

4.1.1 Deskripsi Panel dan Variasi Laminasi Komposit

Penelitian ini menggunakan beberapa variasi susunan laminasi antara serat aramid dan serat daun nanas untuk mengetahui pengaruh konfigurasi lapisan terhadap kekuatan bending komposit hibrida. Variasi laminasi disusun dengan kombinasi serat lapisan serat sintesis dan serat alam pada posisi yang berbeda.

Tabel 4. 1 Variasi Spesimen Uji (Sumber: Penulis, 2026)

Variasi	Konfigurasi	Susunan Lapisan	Komposisi Aramid: Nanas
A	<i>Interleaved</i>	Aramid/Nanas/Aramid /Nanas	2:2
B	Aramid-luar	Aramid/ Nanas/Nanas /Aramid	2:2
C	Nanas-luar	Nanas/Aramid/Aramid /Nanas	2:2

Keterangan:

A = Serat Aramid

N = Serat Daun Nanas (PALF)

Pada variasi laminasi tertentu, serat aramid ditempatkan pada bagian terluar laminasi untuk meningkatkan kemampuan spesimen dalam menerima tegangan Tarik dan tekan saat pengujian bending selama berlangsung. Sementara itu, serat daun nanas digunakan sebagai kombinasi serat alam pada bagian Tengah laminasi untuk membentuk struktur komposit hybrid yang lebih ringan.

4.1.2 Dimensi Spesimen

Setelah proses curing selesai, panel komposit dipotong menjadi spesimen pengujian bending berdasarkan standar ISO 14125 menggunakan metode *Three-Point Bending*. Dimensi spesimen disesuaikan dengan rasio span terhadap ketebalan spesimen sesuai standar pengujian bending komposit.

Tabel 4. 2 Dimensi Spesimen Variasi A (Sumber: Penulis, 2026)

Spesimen	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Massa (g)
A1	160	15	7	20,17
A2	160	15	7	20,17
A3	160	15	7	20,17
A4	160	15	7	20,17

Tabel 4. 3 Dimensi Spesimen Variasi B (Sumber: Penulis, 2026)

Spesimen	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Massa (g)
A1	160	15	7	20,17
A2	160	15	7	20,17
A3	160	15	7	20,17
A4	160	15	7	20,17

Tabel 4. 4 Dimensi Spesimen Variasi C (Sumber: Penulis, 2026)




Spesimen	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Massa (g)
A1	160	15	7	20,17
A2	160	15	7	20,17
A3	160	15	7	20,17
A4	160	15	7	20,17

Berdasarkan hasil pengukuran, seluruh spesimen memiliki dimensi yang seragam baik dari sisi Panjang, lebar, maupun tebal. Keseragaman dimensi spesimen bertujuan untuk meminimalkan pengaruh perbedaan ukuran terhadap hasil pengujian bending sehingga perbedaan performa mekanik yang diperoleh lebih dipengaruhi oleh variasi susunan laminasi komposit.

4.1.3 Hasil Laminasi

Penelitian ini dilaksanakan sebagai penelitian experimental laboratorium yang bertujuan untuk memperoleh data kuantitatif mengenai karakteristik bending komposit hybrid serat aramid dan serat daun nanas (PALF) berbasis resin sebagai material alternatif gading kapal ikan. Fokus utama penelitian ini yaitu mengevaluasi pengaruh variasi susunan laminasi terhadap kekuatan bending, modulus lentur, serta perilaku kegagalan material komposit hybrid.

Tabel 4. 5 Hasil Pematongan Spesimen (Sumber: Penulis, 2026)

Spesimen Variasi A	Spesimen Variasi B	Spesimen Variasi C
		

4.1.4 Perhitungan Fraksi Volume Spesimen

Sebelum dilakukan pengujian bending, dilakukan estimasi fraksi volume serat dan resin untuk mengevaluasi kesesuaian spesimen hasil fabrikasi terhadap komposisi yang direncanakan. Perhitungan dilakukan berdasarkan dimensi spesimen, massa spesimen, serta densitas masing-masing material penyusun, yaitu serat aramid, serat daun nanas (PALF), dan resin.

Diketahui:

$$p = 160 \text{ mm}$$

$$b = 15 \text{ mm}$$

$$t = 7 \text{ mm}$$

$$m_s = 20,17 \text{ g}$$

$$\rho_A = 1,44 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_P = 1,53 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_r = 1.10 \text{ g/cm}^3$$

2 Aramid: 2 PALF

- Volume Spesimen

$$\begin{aligned}V_s &= p \times b \times t \\&= 160 \times 15 \times 7 \\&= 16800 \text{ mm}^3 \\&= 16.8 \text{ cm}^3\end{aligned}$$

- Densitas Komposit

$$\begin{aligned}\rho_s &= \frac{m_s}{V_s} \\&= \frac{20.17}{16.8} \\&= 1.2006 \text{ g/cm}^3\end{aligned}$$

- Densitas Rata-rata Serat

$$\begin{aligned}\rho_f &= \frac{(2 \times \rho_A) + (2 \times \rho_P)}{2 + 2} \\&= \frac{(2 \times 1.44) + (2 \times 1.53)}{4} \\&= \frac{2.88 + 3.06}{4} \\&= 1.485 \text{ g/cm}^3\end{aligned}$$

- Persamaan *Rule of Mixtures*

$$\rho_s = \rho_f V_f + \rho_r V_r$$

$$V_f + V_r = 1$$

$$V_r = 1 - V_f$$

$$\begin{aligned}1.2006 &= 1.485V_f + 1.10(1 - V_f) \\&= 1.485V_f + 1.10 - 1.10V_f \\&= 1.10 + 0.385V_f\end{aligned}$$

- Fraksi Volume Serat

$$\begin{aligned}V_f &= \frac{1.2006 - 1.10}{0.385} \\&= 0.2613 \\&= 26.13\%\end{aligned}$$

- Fraksi Volume Resin

$$\begin{aligned} V_r &= 100 - 26,13 \\ &= 73,87\% \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil pengukuran dimensi dan massa spesimen, dilakukan estimasi fraksi volume serat menggunakan pendekatan densitas komposit (Rule of Mixtures). Data yang digunakan meliputi massa spesimen sebesar 20,17 g, dimensi spesimen 160 mm × 15 mm × 7 mm, densitas serat aramid sebesar 1,44 g/cm³, densitas serat PALF sebesar 1,53 g/cm³, dan densitas resin sebesar 1,10 g/cm³. Untuk menjaga konsistensi komposisi material antar spesimen, seluruh spesimen difabrikasi menggunakan jumlah lapisan serat yang sama, ukuran potongan serat yang identik, dimensi cetakan yang seragam, serta prosedur hand lay-up yang sama pada setiap variasi laminasi. Fraksi volume serat tidak diukur secara langsung menggunakan metode destruktif seperti ASTM D3171, melainkan diestimasi berdasarkan massa spesimen, volume spesimen, dan densitas masing-masing material penyusun. Hasil perhitungan menunjukkan estimasi fraksi volume serat sebesar 26,13% dan fraksi volume resin sebesar 73,87%. Mengingat seluruh spesimen diproduksi dengan jumlah lapisan, ukuran potongan serat, dimensi cetakan, dan prosedur fabrikasi yang identik, nilai tersebut diasumsikan representatif terhadap komposisi spesimen lain yang difabrikasi dengan prosedur yang sama.

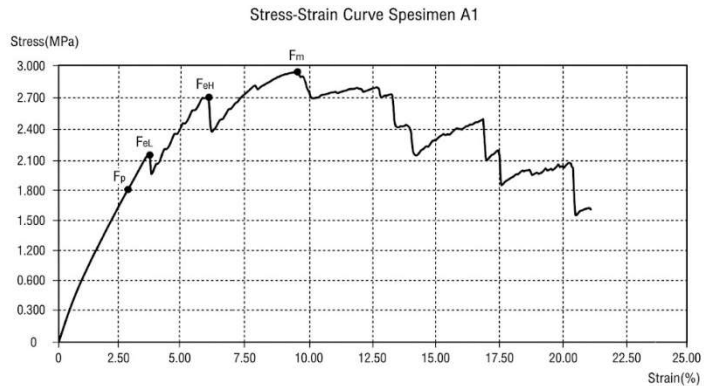
4.2 Hasil Pegujian Bending Komposit Hibrida

Pengujian bending pada seluruh spesimen komposit hibrida dilakukan menggunakan metode *Three-Point Bending* sesuai standar ISO 14125 mengenai penentuan sifat lentur komposit plastik yang diperkuat serat. Pengujian bertujuan untuk memperoleh data tegangan lentur, modulus lentur, serta perilaku kegagalan material di bawah pembebanan lentur yang terkontrol. Setiap spesimen diuji secara individual dan hasilnya direkam dalam bentuk kurva hubungan tegangan-regangan (*Stress-Strain*) yang kemudian dianalisis berdasarkan titik-titik karakteristik, yaitu batas elastis (*Elastic Limit*), tegangan batas bawah kerusakan (FeL), tegangan batas atas kerusakan (FeH), tegangan pasca kerusakan (Fp), serta tegangan maksimum (Fm).

4.2.1 Hasil Pengujian Variabel A (ANAN)

Pengujian bending pada Variasi A menggunakan susunan laminasi Interleaved ANAN (Aramid–Nanas–Aramid–Nanas), di mana serat aramid dan serat daun nanas ditempatkan secara selang-seling dari lapisan terluar hingga lapisan terdalam. Konfigurasi ini menempatkan serat aramid sekaligus pada posisi terluar dan lapisan

ketiga, sehingga beban lentur yang bekerja didistribusikan kepada kedua lapisan aramid tersebut. dengan hasil pengujian bending seperti berikut:



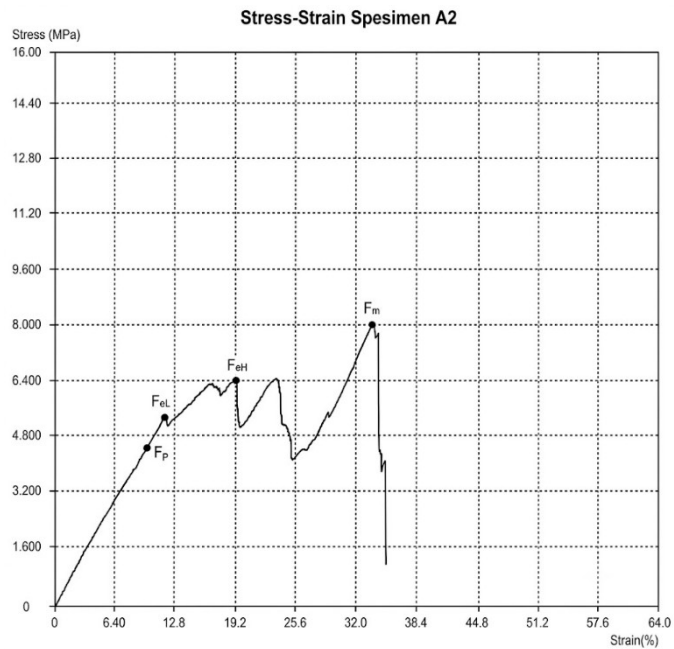
Gambar 4. 2 Grafik *Stress-Strain* Spesimen A1 (Sumber: Penulis, 2026)

Keterangan:

Tabel 4. 6 Parameter Grafik *Stress-Strain* Spesimen A1 (Sumber: Penulis, 2026)

Parameter	Nilai
<i>Elastic Limit</i>	2,0 MPa
FeL	2,0 MPa
FeH	2,6 MPa
Fp	1,9 MPa
Fm	2,9 MPa
<i>Strain Maximum</i>	21%

Berdasarkan kurva tegangan-regangan spesimen A1, material menunjukkan respons elastis linear hingga mencapai batas elastis sebesar 2,0 MPa. Nilai FeL dan FeH yang sama (2,0 MPa) dan relatif berdekatan (2,6 MPa) mengindikasikan bahwa inisiasi kerusakan matriks terjadi secara hampir bersamaan dengan awal deformasi in elastis, yang merupakan karakteristik tipikal komposit hibrid berbasis serat alam dengan ikatan antarmuka serat-matriks yang belum optimal. Tegangan maksimum (Fm) sebesar 2,9 MPa dengan regangan maksimum 21% menunjukkan karakteristik kegagalan progresif (*progressive failure*) material tidak runtuh secara mendadak melainkan melalui serangkaian mekanisme delaminasi bertahap yang memungkinkan penyerapan energi yang relatif baik sebelum kegagalan akhir.



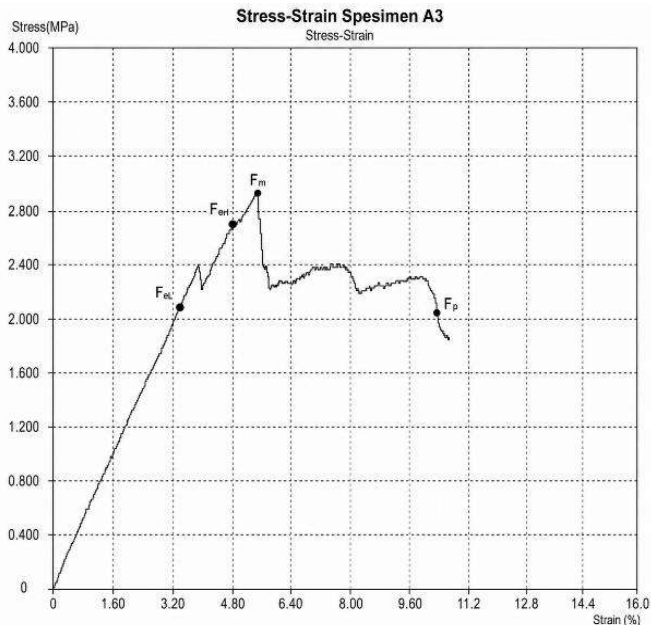
Gambar 4. 3 Grafik Stress-Strain Spesimen A2
(Sumber: Penulis, 2026)

Keterangan:

Tabel 4. 7 Parameter Grafik *Stress-Strain* Spesimen A2 (Sumber: Penulis, 2026)

Parameter	Nilai
<i>Elastic Limit</i>	5,2 MPa
FeL	5,2 MPa
FeH	6,3 MPa
Fp	4,4 MPa
Fm	8,0 MPa
<i>Strain Maximum</i>	35%

Spesimen A2 menunjukkan performa mekanik yang secara signifikan lebih unggul dibandingkan A1. Batas elastis yang lebih tinggi (5,2 MPa) mengindikasikan kekakuan awal yang lebih baik, yang secara kausal berkorelasi dengan distribusi resin yang lebih merata pada spesimen ini selama proses fabrikasi. Tegangan maksimum F_m sebesar 8,0 MPa dengan regangan 35% mencerminkan kemampuan penyerapan energi yang jauh lebih tinggi. Penurunan pada titik F_p (4,4 MPa) sebelum pemulihan menuju F_m mengindikasikan terjadinya kerusakan parsial pada lapisan serat nanas di posisi tengah, yang kemudian di kompensasi oleh lapisan aramid yang masih utuh suatu mekanisme yang dikenal sebagai hybrid effect dalam komposit berlapis.



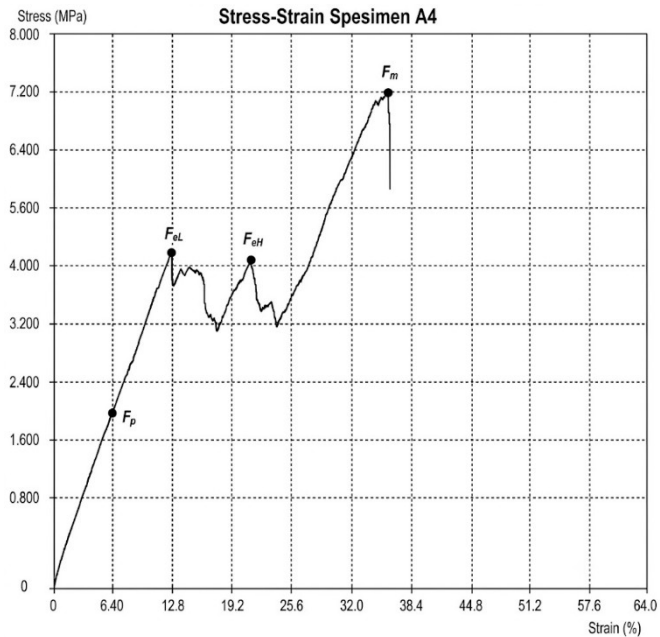
Gambar 4. 4 Grafik Stress-Strain Spesimen A3
(Sumber: Penulis, 2026)

Keterangan:

Tabel 4. 8 Parameter Grafik *Stress-Strain* Spesimen A3 (Sumber: Penulis, 2026)

Parameter	Nilai
<i>Elastic Limit</i>	2,1 MPa
F_{eL}	2,1 MPa
F_{eH}	2,7 MPa
F_p	2,1 MPa
F_m	3,0 MPa
<i>Strain Maximum</i>	10%

Spesimen A3 menunjukkan pola respons yang serupa dengan A1, dengan batas elastis 2,1 MPa dan tegangan maksimum 3,0 MPa. Nilai regangan maksimum yang lebih rendah (10%) dibandingkan A1 (21%) mengindikasikan kegagalan yang lebih cepat, yang kemungkinan disebabkan oleh konsentrasi void content yang lebih tinggi pada spesimen ini akibat proses *hand lay-up* yang tidak sepenuhnya homogen. Fenomena ini merupakan salah satu tantangan utama metode fabrikasi manual pada komposit hibrid berbasis serat alam, di mana variabilitas antarpesimen yang tinggi merupakan hal yang lazim.



Gambar 4. 5 Grafik Stress-Strain Spesimen A4
(Sumber: Penulis, 2026)

Keterangan:

Tabel 4. 9 Parameter Grafik *Stress-Strain* Spesimen A4 (Sumber: Penulis, 2026)

Parameter	Nilai
<i>Elastic Limit</i>	4,1 MPa
FeL	4,1 MPa
FeH	4,9 MPa
Fp	1,8 MPa
Fm	7,2 MPa
<i>Strain Maximum</i>	36%

Spesimen A4 memperlihatkan karakteristik menarik dimana nilai F_{eL} (4,1 MPa) yang lebih rendah dibandingkan F_{eH} (4,9 MPa), mengindikasikan peningkatan tegangan yang masih berlangsung pada fase transisi elastis-ke-plastis akibat redistribusi beban antar-lapisan secara progresif. Setelah mengalami penurunan

tegangan pada titik Fp (1,8 MPa), tegangan kembali meningkat hingga mencapai nilai maksimum pada Fm sebesar 7,2 MPa, yang diduga berkaitan dengan kontribusi serat aramid sebagai lapisan pendukung sekunder. Regangan maksimum sebesar 36% sebelum kegagalan akhir menunjukkan daktilitas yang relatif baik untuk komposit hybrid ini.

Data hasil pengujian bending yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menghitung nilai tegangan lentur dan modulus lentur. Perhitungan ini bertujuan untuk menentukan respon mekanis spesimen A terhadap pembebanan lentur berdasarkan parameter yang ditetapkan dalam standar ISO 14125:1998.

- Tegangan Lentur Spesimen A

$$\sigma_{A1} = \frac{3(298)(128)}{2(15)(7^2)} = 77,8 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{A2} = \frac{3(819)(128)}{2(15)(7^2)} = 213,9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{A3} = \frac{3(302)(128)}{2(15)(7^2)} = 78,8 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{A4} = \frac{3(696)(128)}{2(15)(7^2)} = 181,8 \text{ MPa}$$

- Modulus Lentur Spesimen A

$$E_{f,A1} = \frac{128^3 \times 50}{4 \times 15 \times 7^3} = 5,1 \text{ GPa}$$

$$E_{f,A2} = \frac{128^3 \times 50}{4 \times 15 \times 7^3} = 5,1 \text{ GPa}$$

$$E_{f,A3} = \frac{128^3 \times 65,6}{4 \times 15 \times 7^3} = 6,69 \text{ GPa}$$

$$E_{f,A4} = \frac{128^3 \times 32}{4 \times 15 \times 7^3} = 3,26 \text{ GPa}$$

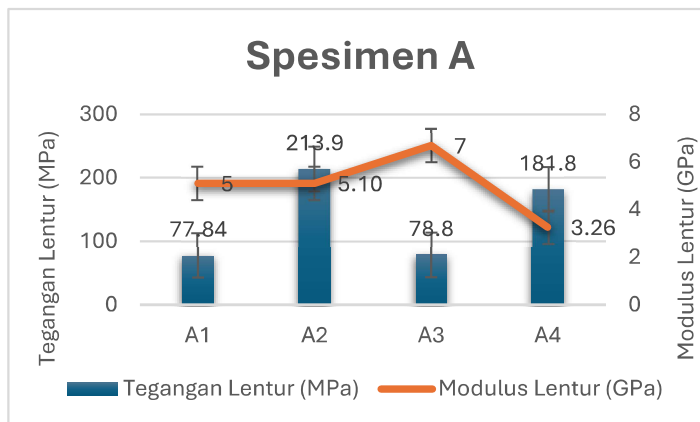
Tabel 4. 10 Hasil Pengujian Bending Variasi A (Sumber: Penulis, 2026)

Spesimen	Tegangan Lentur (MPa)	Modulus Lentur (GPa)	Maximum load (N)
A1	77,84	5,1	298
A2	213,9	5,1	819
A3	78,8	6,69	302
A4	181,8	3,26	696
Rata Rata (\bar{x})	138,09	5,03	528

Berdasarkan Tabel, spesimen A2 mencatatkan nilai tegangan lentur tertinggi sebesar 213,9 MPa dengan *maximum load* 819 N, diikuti oleh A4 dengan tegangan lentur 181,8 MPa dan *maximum load* 696 N. Sementara itu, spesimen A1 dan A3 memiliki nilai tegangan lentur yang relatif rendah, masing-masing sebesar 77,84 MPa dan 78,8 MPa, dengan *maximum load* 298 N dan 302 N. Perbedaan yang signifikan antara spesimen dalam variasi yang sama ini secara langsung mencerminkan variabilitas kualitas laminasi yang merupakan karakteristik inheren dari proses fabrikasi *hand lay-up*.

Pada parameter modulus lentur, terdapat pola yang berbeda dari parameter tegangan lentur: spesimen A3 mencatatkan modulus lentur tertinggi sebesar 6,69 GPa, diikuti oleh A1 dan A2 yang memiliki nilai modulus identik sebesar 5,1 GPa, sementara A4 menunjukkan modulus terendah sebesar 3,26 GPa. Fenomena ini mengindikasikan adanya hubungan terbalik antara kekuatan dan kekakuan pada beberapa spesimen, khususnya pada A3 yang justru memiliki tegangan lentur terendah kedua (78,8 MPa) namun modulus lentur tertinggi, serta pada A2 yang memiliki tegangan lentur tertinggi (213,9 MPa) namun modulus lentur yang hanya setara dengan A1. Pola ini berkaitan dengan perbedaan fraksi volume serat aktual antar-spesimen, di mana spesimen dengan kandungan resin lebih tinggi cenderung memiliki kekakuan awal (modulus) yang lebih rendah, namun dapat menunjukkan tegangan puncak yang lebih tinggi akibat peningkatan keuletan matriks sebelum kegagalan akhir.

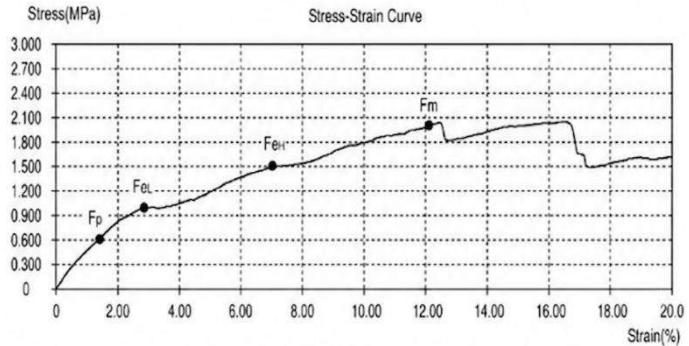
Rata-rata tegangan lentur variasi A sebesar 138,09 MPa, rata-rata modulus lentur 5,03 GPa, dan rata-rata maximum load 528,0 N.



Gambar 4. 6 Perbandingan Hasil Uji Antar Spesimen A (Sumber: Penulis, 2026)

4.2.2 Hasil Pengujian Variabel B (ANNA)

Pengujian bending pada Variasi B menggunakan susunan laminasi ANNA (Aramid–Nanas–Nanas–Aramid), di mana serat aramid ditempatkan sebagai lapisan terluar di kedua sisi (lapisan pertama dan keempat) sementara dua lapisan serat daun nanas menjadi inti di bagian tengah. Konfigurasi ini menyerupai prinsip konstruksi sandwich, di mana lapisan kulit (skin) yang kuat menjepit inti yang lebih lunak sebuah pendekatan yang secara teoritis mengoptimalkan distribusi tegangan lentur pada komponen komposit



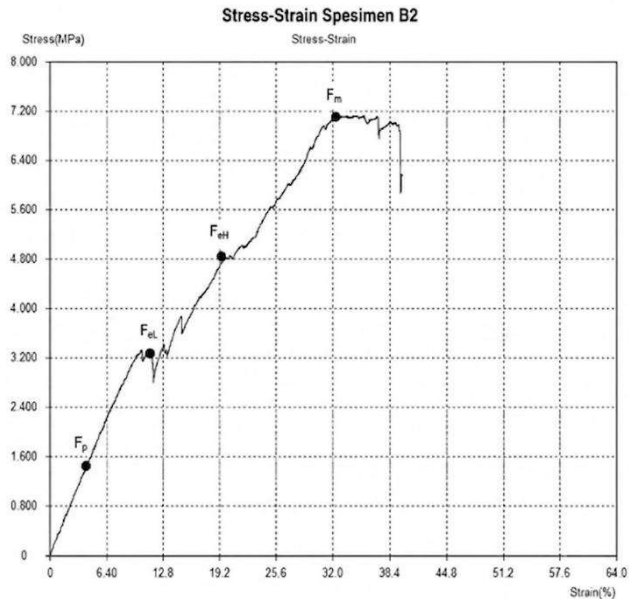
Gambar 4. 7 Grafik Stress-Strain Spesimen B1
(Sumber: Penulis, 2026)

Keterangan:

Tabel 4. 11 Parameter Grafik *Stress-Strain*
Spesimen B1 (Sumber: Penulis, 2026)

Parameter	Nilai
<i>Elastic Limit</i>	1,0 MPa
F_{eL}	1,0 MPa
F_{eH}	1,6 MPa
F_p	0,75 MPa
F_m	2,1 MPa
<i>Strain Maximum</i>	20%

Spesimen B1 menunjukkan batas elastis terendah di antara seluruh spesimen variasi B (1,0 MPa), yang mengindikasikan kekakuan awal yang rendah. Meskipun demikian, kurva *Stress-Strain* memperlihatkan respons yang relatif stabil pasca batas elastis, dengan tegangan terus meningkat secara gradual hingga mencapai F_m sebesar 2,1 MPa. Nilai F_p (0,75 MPa).



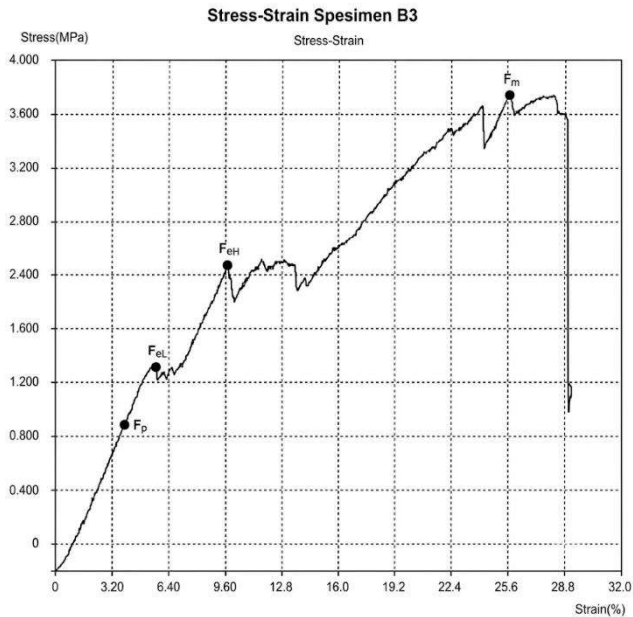
Gambar 4. 8 Grafik Stress-Strain Spesimen B2
(Sumber: Penulis, 2026)

Keterangan:

Tabel 4. 12 Parameter Grafik *Stress-Strain*
Spesimen B2 (Sumber: Penulis, 2026)

Parameter	Nilai
<i>Elastic Limit</i>	3,2 MPa
FeL	3,2 MPa
FeH	4,8 MPa
Fp	1,5 MPa
Fm	7,2 MPa
<i>Strain Maximum</i>	40%

Spesimen B2 menunjukkan performa mekanik yang sangat baik dengan F_m sebesar 7,2 MPa dan regangan maksimum 40%, yang mengindikasikan kombinasi kekuatan dan keuletan yang baik. Nilai F_p (1,5 MPa), Pola ini konsisten dengan mekanisme kegagalan pada komposit sandwich di mana delaminasi antara lapisan aramid terluar dan inti nanas terjadi secara terkontrol, memberikan peringatan dini sebelum kegagalan total. Regangan 40% mengindikasikan tingkat daktilitas yang tinggi berkat kontribusi serat aramid yang memiliki sifat elongasi tinggi.



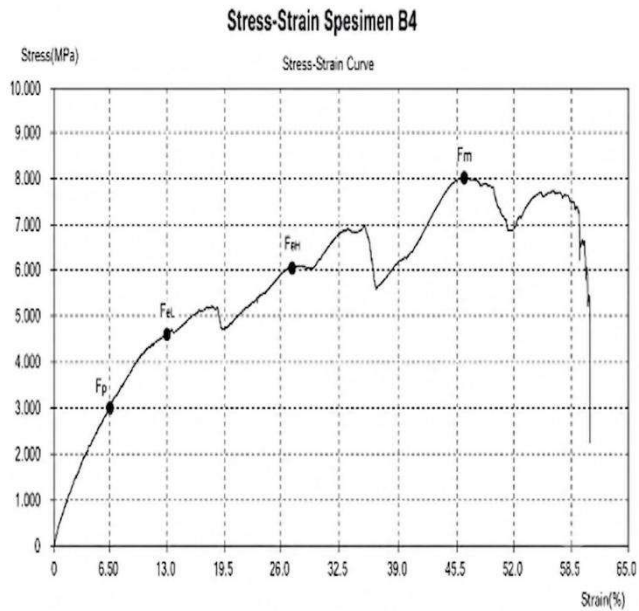
Gambar 4. 9 Grafik Stress-Strain Spesimen B3
(Sumber: Penulis, 2026)

Keterangan:

Tabel 4. 13 Parameter Grafik *Stress-Strain*
Spesimen B3 (Sumber: Penulis, 2026)

Parameter	Nilai
<i>Elastic Limit</i>	1,3 MPa
FeL	1,3 MPa
FeH	2,4 MPa
Fp	1,0 MPa
Fm	3,8 MPa
<i>Strain Maximum</i>	29%

Spesimen B3 memperlihatkan kurva tegangan-regangan dengan pola kenaikan yang bertahap dan fluktuatif pasca batas elastis, mencerminkan terjadinya retak mikro yang berulang pada matriks selama proses pembebanan. Tegangan maksimum Fm sebesar 3,8 MPa dengan Fp (1,0 MPa) menunjukkan mekanisme kegagalan yang stabil. Nilai performa menengah pada spesimen ini dibandingkan B2 dan B4 kemungkinan disebabkan oleh distribusi void yang tidak merata pada lapisan inti nanas, yang merupakan sumber kelemahan struktural pada komposit serat alam yang di fabrikasi secara manual.



Gambar 4. 10 Grafik Stress-Strain Spesimen B4
(Sumber: Penulis, 2026)

Keterangan:

Tabel 4. 14 Parameter Grafik *Stress-Strain* Spesimen B4 (Sumber: Penulis, 2026)

Parameter	Nilai
<i>Elastic Limit</i>	4,5 MPa
FeL	4,5 MPa
FeH	6,2 MPa
Fp	3,0 MPa
Fm	8,1 MPa
<i>Strain Maximum</i>	63%

Spesimen B4 mencatatkan performa terbaik dalam seluruh kelompok pengujian, dengan tegangan maksimum F_m sebesar 8,1 MPa dan regangan maksimum yang sangat tinggi (63%). Nilai F_p sebesar 3,0 MPa, lapisan aramid terluar tetap mampu menahan beban tambahan sebelum kegagalan akhir. Regangan 63% yang sangat besar merupakan manifestasi dari sifat aramid yang dikenal memiliki ketangguhan tinggi (*high toughness*) dan kemampuan elongasi yang baik dalam kondisi pembebanan lentur.

Data hasil pengujian bending yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menghitung nilai tegangan lentur dan modulus lentur. Perhitungan ini bertujuan untuk menentukan respons mekanis spesimen B terhadap pembebanan lentur berdasarkan parameter yang ditetapkan dalam standar ISO 14125:1998.

- Tegangan Lentur Spesimen B

$$\sigma_{B1} = \frac{3(208)(128)}{2(15)(7^2)} = 54,3 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{B2} = \frac{3(716)(128)}{2(15)(7^2)} = 187 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{B3} = \frac{3(388)(128)}{2(15)(7^2)} = 101 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{B4} = \frac{3(814)(128)}{2(15)(7^2)} = 212,6 \text{ Mpa}$$

- Modulus Lentur Spesimen B

$$E_{f,B1} = \frac{128^3 \times 35,71}{4 \times 15 \times 7^3} = 3,64 \text{ GPa}$$

$$E_{f,B2} = \frac{128^3 \times 33,33}{4 \times 15 \times 7^3} = 3,40 \text{ GPa}$$

$$E_{f,B3} = \frac{128^3 \times 23,21}{4 \times 15 \times 7^3} = 2,37 \text{ GPa}$$

$$E_{f,B4} = \frac{128^3 \times 34,62}{4 \times 15 \times 7^3} = 3,53 \text{ GPa}$$

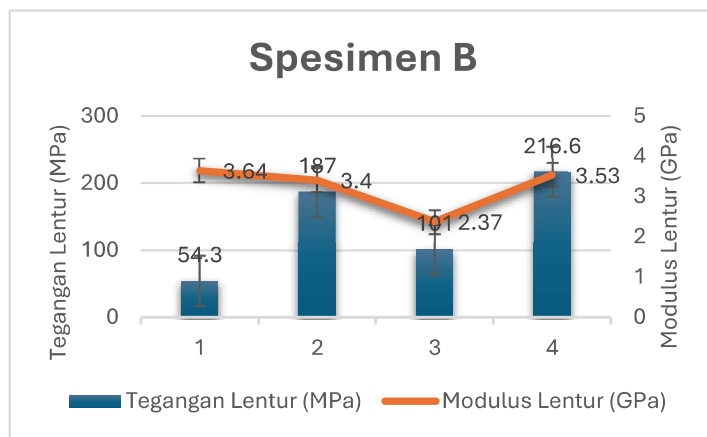
Tabel 4. 15 Hasil Pengujian Bending Spesimen Variasi B (Sumber: Penulis, 2026)

Spesimen	Tegangan Lentur (MPa)	Modulus Lentur (GPa)	Maximum load (N)
B1	54,3	3,64	208
B2	187	3,40	716
B3	101	2,37	388
B4	216,6	3,53	814
Rata Rata (\bar{x})	139,73	3,23	531,5

Berdasarkan Tabel 4.15, spesimen B4 mencatatkan nilai tertinggi dalam tegangan lentur (216,6 MPa) dan maximum load (814 N), sementara spesimen B2 menunjukkan tegangan lentur tertinggi kedua (187 MPa) dengan maximum load 716 N. Spesimen B1 memiliki nilai terendah pada parameter tegangan lentur dan maximum load (tegangan lentur 54,3 MPa; maximum load 208 N),

yang kemungkinan berkaitan dengan kualitas laminasi yang kurang optimal pada spesimen tersebut. Sementara itu, pada parameter modulus lentur, spesimen B3 justru mencatatkan nilai terendah (2,37 GPa), sedangkan B1 menunjukkan modulus tertinggi (3,64 GPa), menandakan tidak adanya korelasi langsung antara kekuatan dan kekakuan pada variasi B.

Pada parameter modulus lentur, variasi B menunjukkan kisaran yang lebih sempit (2,37–3,64 GPa) dibandingkan variasi A (3,26–6,69 GPa). Hal ini mencerminkan bahwa konfigurasi ANNA dengan inti ganda menghasilkan kekakuan yang relatif lebih konsisten antar-spesimen dibandingkan konfigurasi Interleaved ANAN, meskipun tegangan puncak yang dicapai relatif setara. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui teori Rule of Mixtures untuk modulus efektif komposit berlapis, di mana konsentrasi lapisan PALF bermodulus rendah di posisi tengah menurunkan kontribusi modulus efektif keseluruhan laminat.

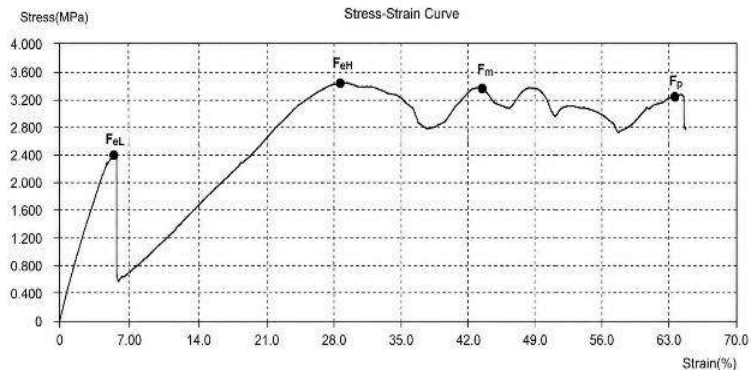


Gambar 4. 11 Perbandingan Hasil Uji antar Spesimen B (Sumber: Penulis, 2026)

4.2.3 Hasil Pengujian Variabel C (NAAN)

Pengujian bending pada Variasi C menggunakan susunan laminasi NAAN (Nanas–Aramid–Aramid–Nanas), di mana serat daun nanas ditempatkan sebagai lapisan terluar di kedua sisi sementara dua lapisan serat aramid berada di bagian tengah. Konfigurasi ini merupakan kebalikan dari variasi B, dan secara mekanik menempatkan serat bermodulus rendah (nanas) pada posisi yang menanggung tegangan lentur terbesar yakni lapisan terluar yang paling jauh dari sumbu netral.

Stress-Strain Spesimen C1



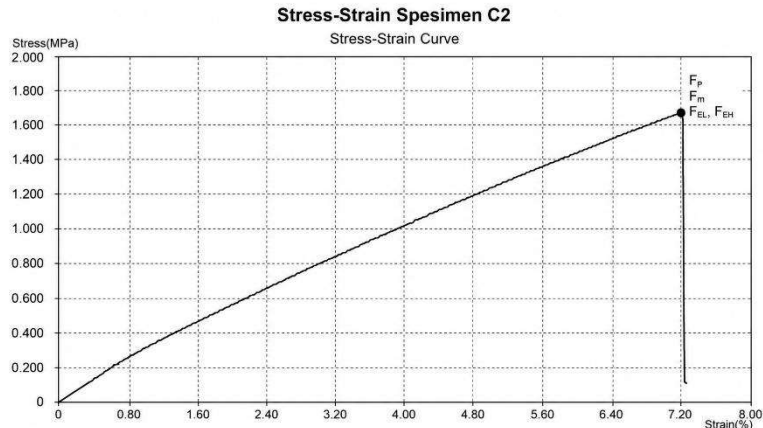
Gambar 4. 12 Grafik Stress-Strain Spesimen C1
(Sumber: Penulis, 2026)

Keterangan:

Tabel 4. 16 Parameter Grafik *Stress-Strain*
Spesimen C1 (Sumber: Penulis, 2026)

Parameter	Nilai
<i>Elastic Limit</i>	2,4 MPa
FeL	2,4 MPa
FeH	3,4 MPa
Fp	3,3 MPa
Fm	3,5 MPa
<i>Strain Maximum</i>	64%

Spesimen C1 memperlihatkan kurva tegangan-regangan dengan batas elastis 2,4 MPa dan tegangan maksimum 3,5 MPa. Yang menonjol adalah nilai regangan maksimum yang sangat tinggi (64%), yang mencerminkan sifat serat daun nenas sebagai lapisan terluar yang memberikan fleksibilitas dan daktilitas tinggi pada spesimen ini. Nilai Fp (3,3 MPa) yang berdekatan dengan Fm (3,5 MPa) menunjukkan mekanisme kegagalan yang relatif bertahap. Meskipun tegangan puncaknya lebih rendah dari variasi A dan B, kemampuan deformasi yang sangat tinggi ini berpotensi memberikan keunggulan pada aplikasi yang membutuhkan penyerapan energi impact.



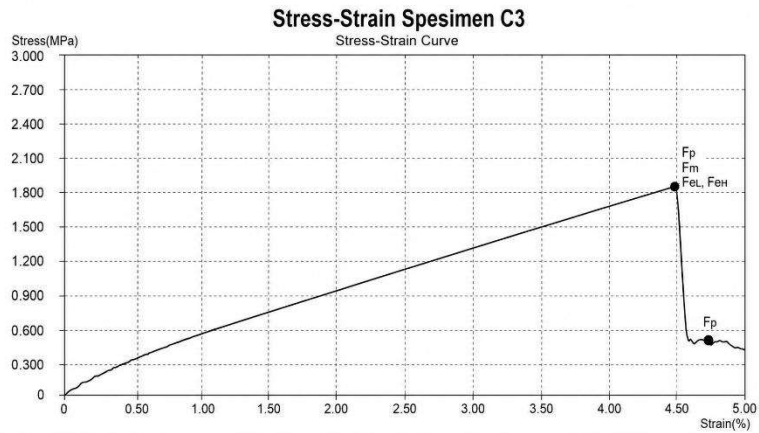
Gambar 4. 13 Grafik Stress-Strain Spesimen C2
(Sumber: Penulis, 2026)

Keterangan:

Tabel 4. 17 Parameter Grafik *Stress-Strain*
Spesimen C2 (Sumber: Penulis, 2026)

Parameter	Nilai
<i>Elastic Limit</i>	1,68 MPa
FeL	1,68 MPa
FeH	1,68 MPa
Fp	1,68 MPa
Fm	1,6 MPa
<i>Strain Maximum</i>	7,2%

Spesimen C2 menunjukkan perilaku material yang bersifat brittle (getas) dengan seluruh titik karakteristik tegangan — Elastic Limit, FeL, FeH, dan FP bernilai sama sebesar 1,68 MPa, sementara tegangan maksimum Fm tercatat sebesar 1,6 MPa. Koinsidensinya keempat titik karakteristik pada satu nilai tegangan mengindikasikan bahwa spesimen tidak memiliki zona plastis yang terdiferensiasi, sehingga kegagalan berlangsung secara tiba-tiba tanpa deformasi permanen yang berarti konsisten dengan karakteristik komposit yang didominasi matriks epoksi dengan fraksi volume resin tinggi. Nilai FP (1,68 MPa) yang sedikit lebih tinggi dari Fm (1,6 MPa) mengindikasikan bahwa tegangan puncak sesungguhnya terjadi pada fase awal pembebanan sebelum terjadinya pelepasan energi bertahap (progressive micro-cracking), yang pada akhirnya menurunkan kapasitas beban hingga tercatat sebagai Fm. Regangan maksimum sebesar 7,2% menunjukkan bahwa meskipun material bersifat getas secara struktural, lapisan serat alam PALF pada posisi terluar masih memberikan kapasitas deformasi yang relatif besar sebelum kegagalan akhir terjadi.



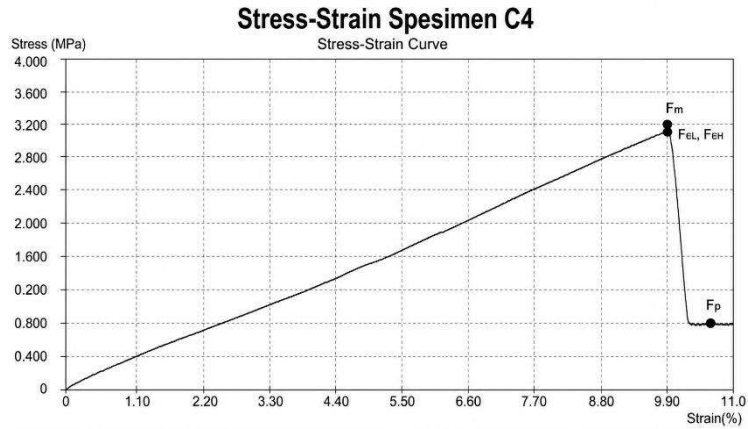
Gambar 4. 14 Grafik Stress-Strain Spesimen C3
(Sumber: Penulis, 2026)

Keterangan:

Tabel 4. 18 Parameter Grafik *Stress-Strain*
Spesimen C3 (Sumber: Penulis, 2026)

Parameter	Nilai
<i>Elastic Limit</i>	1,81 MPa
FeL	1,81 MPa
FeH	1,81 MPa
Fp	0,5 MPa
Fm	1,81 MPa
<i>Strain Maximum</i>	4,8%

Spesimen C3 menunjukkan nilai Elastic Limit, FeL, FeH, dan Fm yang sama sebesar 1,81 MPa, dengan regangan maksimum sebesar 4,8%, yang mengindikasikan kegagalan yang relatif lebih cepat dan kurang duktail dibandingkan C1 dan C2. Koinsidensinya keempat titik karakteristik pada satu nilai tegangan mengonfirmasi perilaku brittle yang konsisten material berdeformasi secara linear elastis hingga langsung mencapai kegagalan tanpa zona plastis yang terdiferensiasi. Nilai FP yang lebih rendah sebesar 0,5 MPa mengindikasikan adanya gangguan lokal pada fase awal pembebanan, kemungkinan akibat *void* atau *dry spot* pada antarmuka PALF-epoksi, namun komposit tetap mampu menahan beban kembali hingga mencapai tegangan puncak 1,81 MPa. Variabilitas yang besar antara C1, C2, dan C3 mengonfirmasi tingginya ketidakhomogenan karakteristik material pada variasi C, yang merupakan konsekuensi inheren dari proses fabrikasi *hand lay-up* dengan fraksi volume resin tinggi ($\pm 70\%$).



Gambar 4. 15 Grafik Stress-Strain Spesimen C4
(Sumber: Penulis, 2026)

Keterangan:

Tabel 4. 19 Parameter Grafik *Stress-Strain*
Spesimen C4 (Sumber: Penulis, 2026)

Parameter	Nilai
<i>Elastic Limit</i>	3,15 MPa
FeL	3,15 MPa
FeH	3,15 MPa
Fp	1,0 MPa
Fm	3,15 MPa
<i>Strain Maximum</i>	10%

Spesimen C4 memperlihatkan tegangan maksimum tertinggi di antara spesimen variasi C selain C1, yakni Fm sebesar 3,1 MPa, dengan regangan 10%. Kurva *Stress-Strain* memperlihatkan kenaikan tegangan yang cukup stabil hingga Fm sebelum penurunan tajam pada Fp (1,0 MPa). Pola ini mengindikasikan kegagalan yang lebih bersifat brittle dibandingkan C1 dan C2, yang kemungkinan berkaitan dengan orientasi serat aramid bagian tengah yang lebih baik pada spesimen ini sehingga momen kegagalan lebih terkonsentrasi.

Data hasil pengujian bending yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menghitung nilai tegangan lentur dan modulus lentur. Perhitungan ini bertujuan untuk menentukan respons mekanis spesimen C terhadap pembebanan lentur berdasarkan parameter yang ditetapkan dalam standar ISO 14125:1998.

- Tegangan Lentur Spesimen C

$$\sigma_{C1} = \frac{3(354)(128)}{2(15)(7^2)} = 92.4 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{C2} = \frac{3(176)(128)}{2(15)(7^2)} = 45.9 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{C3} = \frac{3(212)(128)}{2(15)(7^2)} = 55.3 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{C4} = \frac{3(312)(128)}{2(15)(7^2)} = 81.5 \text{ Mpa}$$

- Modulus Lentur Spesimen C

$$E_{f,C1} = \frac{128^3 \times 43,64}{4 \times 15 \times 7^3} = 4,45 \text{ GPa}$$

$$E_{f,C2} = \frac{128^3 \times 23,33}{4 \times 15 \times 7^3} = 2,38 \text{ GPa}$$

$$E_{f,C3} = \frac{128^3 \times 40,22}{4 \times 15 \times 7^3} = 4,10 \text{ GPa}$$

$$E_{f,C4} = \frac{128^3 \times 31,82}{4 \times 15 \times 7^3} = 3,24 \text{ GPa}$$

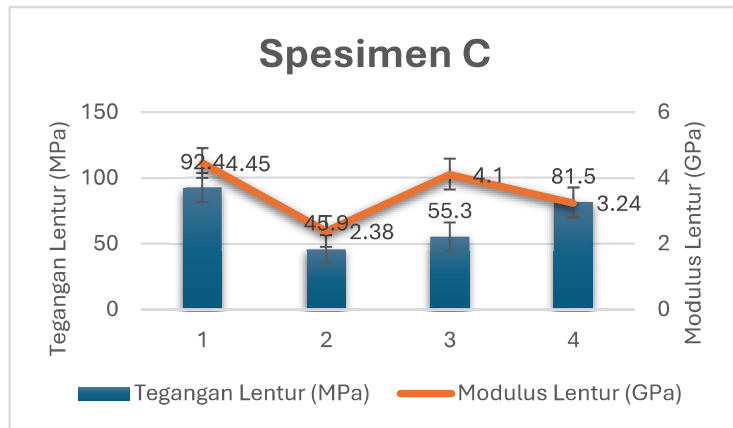
Tabel 4. 20 Hasil Pengujian Spesimen Variasi C (Sumber: Penulis, 2026)

Spesimen	Tegangan Lentur (MPa)	Modulus Lentur (GPa)	<i>Maximum load</i> (N)
C1	92,4	4,45	354
C2	45,9	2,38	176
C3	55,3	4,10	212
C4	81,5	3,24	312
Rata Rata (\bar{x})	68,78	3,54	263,5

Berdasarkan Tabel 4.20, spesimen C1 mencatatkan nilai tegangan lentur tertinggi dalam variasi C (92,4 MPa) dengan *maximum load* 354 N, diikuti oleh C4 (81,5 MPa; 312 N). Spesimen C2 memiliki nilai tegangan lentur terendah (45,9 MPa) dengan *maximum load* 176 N. Secara keseluruhan, seluruh nilai dalam variasi C berada di bawah variasi A dan B, yang secara konsisten mengkonfirmasi bahwa

konfigurasi lapisan terluar serat nanas merupakan faktor pembatas utama performa mekanik komposit ini.

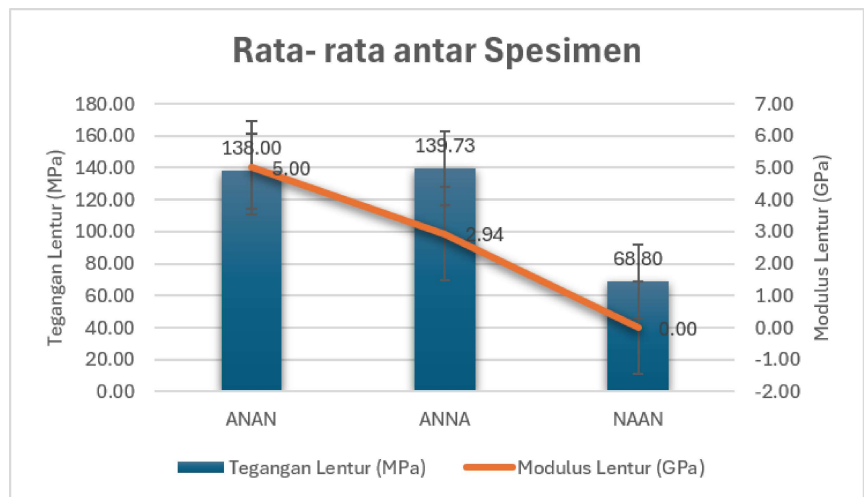
Pada parameter modulus lentur, terdapat pola yang menarik: spesimen C1 memiliki modulus tertinggi (4,45 GPa) yang melampaui seluruh nilai modulus pada variasi B (2,37–3,64 GPa), diikuti oleh C3 (4,10 GPa) yang juga melampaui rentang modulus variasi B, sementara C2 memiliki modulus terendah (2,38 GPa). Hal ini mengindikasikan bahwa orientasi dan distribusi lokal serat aramid pada lapisan tertentu tetap memberikan kontribusi signifikan terhadap kekakuan awal laminat, meskipun kekuatan puncaknya terbatas oleh dominasi lapisan serat nanas (PALF) pada konfigurasi NAAN.



Gambar 4. 16 Perbandingan Hasil Uji Antar Spesimen C (Sumber: Penulis, 2026)

4.2.4 Analisis Perbandingan Antar Variasi

Berdasarkan keseluruhan data hasil pengujian bending pada ketiga variasi, terdapat beberapa pola yang secara konsisten menunjukkan pengaruh signifikan konfigurasi susunan lapisan terhadap sifat mekanik komposit hibrida Aramid–Daun Nanas.



Gambar 4. 17 Perbandingan Hasil Uji Seluruh Spesimen
(Sumber: Penulis, 2026)

Dari segi tegangan lentur rata-rata, variasi B (ANNA) mencatatkan nilai tertinggi sebesar 139,73 MPa, hanya selisih tipis dengan variasi A (ANAN) sebesar 138,00 MPa, sementara variasi C (NAAN) sebesar 68,80 MPa secara signifikan lebih rendah — hampir setengah dari nilai kedua variasi lainnya. Pola ini secara langsung mengonfirmasi bahwa penempatan serat aramid sebagai lapisan terluar (variasi A dan B) merupakan faktor dominan dalam menentukan kapasitas tegangan lentur komposit. Hal ini konsisten dengan teori mekanika laminat (classical laminate theory) yang menyatakan bahwa lapisan terluar menanggung tegangan normal terbesar akibat momen lentur, proporsional terhadap kuadrat jaraknya dari sumbu netral.

Dari segi modulus lentur, variasi A (ANAN) unggul dengan rata-rata 5,03 GPa, diikuti variasi C (NAAN) sebesar 3,54 GPa, dan variasi B (ANNA) sebesar 3,23 GPa. Susunan interleaved ANAN yang menempatkan serat aramid bermodulus tinggi secara terdistribusi di seluruh ketebalan laminat menghasilkan kekakuan efektif tertinggi dibandingkan dua variasi lainnya. Menariknya, variasi C (NAAN) mencatatkan modulus lebih tinggi dari variasi B (ANNA) meskipun tegangan lenturnya jauh lebih rendah. Fenomena ini mengindikasikan bahwa konfigurasi NAAN memiliki kekakuan awal yang relatif baik namun kapasitas kekuatan akhirnya terbatas akibat PALF pada lapisan terluar yang menerima tegangan bending maksimum namun memiliki kekuatan tarik rendah. Fenomena ini selaras dengan prinsip Rule of Mixtures untuk komposit berlapis, di mana distribusi fase penguat yang merata menghasilkan modulus efektif yang lebih optimal.

Dari segi beban maksimum rata-rata, variasi B (ANNA) sebesar 531,5 N sedikit melampaui variasi A (ANAN) sebesar 528,0 N, sedangkan variasi C (NAAN) sebesar 263,5 N hanya mencapai sekitar 50% dari kedua variasi lainnya. Kedekatan nilai antara A dan B pada parameter ini menegaskan bahwa kedua konfigurasi memiliki kapasitas beban puncak yang setara, meskipun mekanisme internalnya berbeda variasi A memanfaatkan distribusi aramid yang merata di seluruh ketebalan laminat, sementara variasi B mengandalkan efek skin-core di mana aramid pada lapisan dalam bekerja sebagai inti penahan beban yang efektif.

4.2.5 Rekapitulasi Data

Rekapitulasi data disusun untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai hasil pengujian bending seluruh spesimen komposit hibrida Aramid–Daun Nanas dari ketiga variasi (A, B, dan C) secara komparatif. Data yang disajikan meliputi tegangan lentur, modulus lentur, dan *maximum load* masing-masing spesimen beserta nilai rata-rata dan nilai tertinggi per variasi, sehingga pengaruh konfigurasi susunan laminasi terhadap sifat mekanik material dapat diidentifikasi secara sistematis.

Tabel 4. 21 Rekapitulasi Data Pengujian Spesimen (Sumber: Penulis, 2026)

REKAPITULASI DATA UJI LENTUR KOMPOSIT ARAMID–DAUN NANAS				
Spesimen	Susunan	Tegangan Lentur (MPa)	Modulus Lentur (GPa)	Maximum load (N)
A1	ANAN	77.84	5	298
A2	ANAN	213.9	5.10	819
A3	ANAN	78.8	6,69	302
A4	ANAN	181.8	3.26	696
B1	ANNA	54.3	3.64	208
B2	ANNA	187	3.4	716
B3	ANNA	101	2.37	388
B4	ANNA	216.6	3.53	814
C1	NAAN	92.4	4.45	354
C2	NAAN	45.9	2.38	176
C3	NAAN	55.3	4.1	212
C4	NAAN	81.5	3.24	312
(\bar{x}) Spesimen A		138	5.03	528
(\bar{x}) Spesimen B		139	3.23	531.5
(\bar{x}) Spesimen C		68.8	3.54	263.5

Kekuatan lentur yang lebih rendah dibandingkan spesimen yang diambil dari bagian tengah panel pada variasi yang sama disebabkan oleh karakteristik proses hand lay-up, di mana tekanan kompaksi yang diberikan secara manual cenderung kurang merata pada bagian tepi cetakan, sehingga distribusi resin dan pembasahan serat pada area tersebut menjadi kurang optimal. Selain itu, kemungkinan terjadinya fraying

pada serat aramid akibat proses pemotongan manual turut berkontribusi terhadap distribusi serat yang tidak merata, khususnya pada area tepi panel. Manifestasi dari kondisi ini bervariasi antar spesimen: pada A1, A3, dan C3, nilai modulus lentur yang relatif tinggi namun kekuatan lentur rendah mengindikasikan karakter kegagalan yang lebih getas, sedangkan pada B1, B3, dan C2, nilai modulus dan kekuatan lentur yang rendah secara bersamaan mengindikasikan kandungan void yang lebih tinggi atau impregnasi serat yang kurang optimal. Meskipun manifestasinya berbeda, kedua kondisi tersebut bersumber dari akar permasalahan yang sama, yaitu ketidakseragaman tekanan kompaksi dan distribusi serat pada bagian tepi panel akibat keterbatasan proses hand lay-up secara manual. Spesimen-spesimen tersebut tetap dipertahankan dalam analisis karena tidak terdapat cacat visual yang melanggar kriteria penerimaan spesimen sesuai ISO 14125:1998, serta untuk merepresentasikan variabilitas nyata yang terjadi pada proses fabrikasi komposit berbasis hand lay-up.

Terlepas dari variabilitas akibat posisi pengambilan spesimen tersebut, nilai rata-rata pada setiap variasi tetap menunjukkan pola yang konsisten dan sejalan dengan hipotesis penelitian. Variasi A (ANAN) dan variasi B (ANNA) secara rata-rata menunjukkan nilai tegangan lentur yang jauh lebih tinggi dibandingkan variasi C (NAAN), dengan rata-rata tegangan lentur variasi A dan B masing-masing sebesar 138,00 MPa dan 139,73 MPa, sedangkan variasi C hanya mencapai 68,80 MPa kurang dari setengah nilai kedua variasi tersebut. Perbedaan ini secara langsung berkaitan dengan posisi serat aramid dalam susunan laminat: pada variasi A dan B, serat aramid berada pada lapisan terluar yang menanggung distribusi tegangan lentur terbesar, sementara pada variasi C posisi tersebut ditempati serat daun nanas yang memiliki kekuatan intrinsik lebih rendah.

Pola yang sejalan dengan teori ini juga terlihat pada parameter modulus lentur dan maximum load. Pada parameter modulus lentur, variasi A (5,03 GPa) menunjukkan keunggulan substansial dibandingkan variasi C (3,54 GPa) dan variasi B (3,23 GPa). Susunan interleaved ANAN yang mendistribusikan serat aramid secara merata di seluruh ketebalan laminat terbukti menghasilkan kekakuan struktural yang paling optimal, sejalan dengan teori Rule of Mixtures untuk komposit berlapis, di mana distribusi fasa penguat bermodulus tinggi yang lebih merata menghasilkan modulus efektif laminat yang lebih tinggi. Menariknya, variasi C (NAAN) mencatatkan modulus lentur (3,54 GPa) yang lebih tinggi dari variasi B (3,23 GPa), meskipun tegangan lentur rata-ratanya jauh lebih rendah mengindikasikan bahwa konfigurasi NAAN memiliki kekakuan awal yang relatif memadai namun kapasitas kekuatan akhirnya terbatas akibat PALF pada lapisan terluar yang menerima tegangan bending maksimum namun memiliki kekuatan tarik intrinsik yang rendah. Sementara itu, untuk parameter maximum load, variasi B (531,5 N) sedikit melampaui variasi A (528,0 N), sementara variasi C (263,5 N) hanya mencapai sekitar 49,6% dari kedua variasi lainnya. Konsistensi pola pada ketiga parameter ini tegangan lentur, modulus lentur, dan maximum load memperkuat indikasi bahwa posisi serat aramid dalam susunan laminat memberikan pengaruh nyata terhadap performa lentur komposit hibrida, terlepas dari variabilitas lokal yang muncul akibat posisi pengambilan spesimen pada panel.

Tabel 4. 22 Hasil Pengujian Tertinggi Tiap Variasi Spesimen (Sumber: Penulis, 2026)

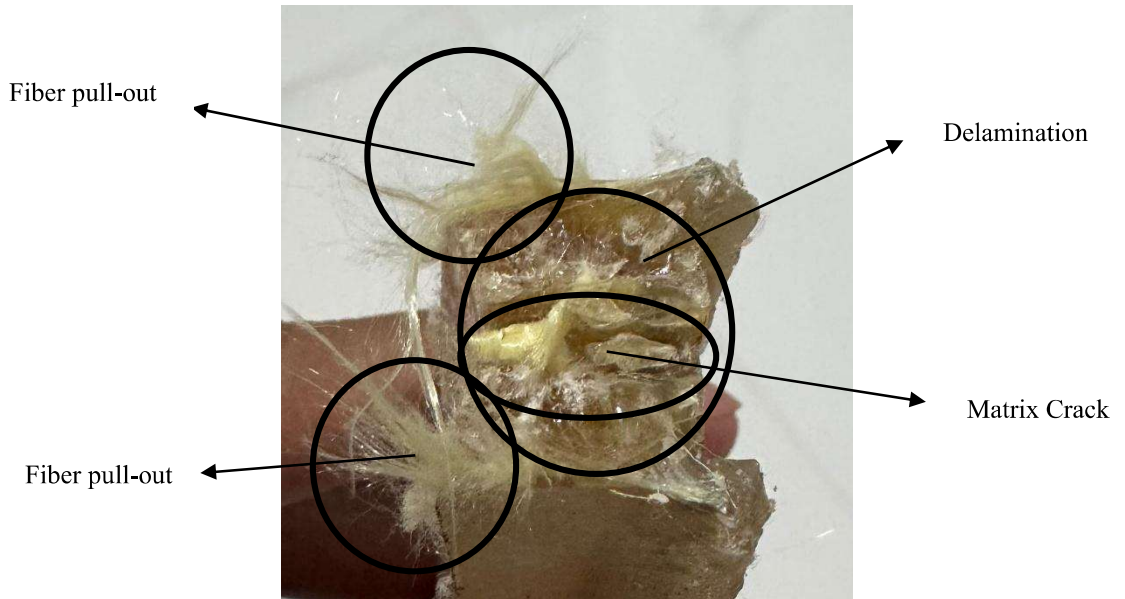
Variasi	Spesimen Terbaik	Tegangan Lentur Tertinggi (MPa)	Modulus Lentur Tertinggi (GPa)	Maximum load Tertinggi (N)
A (ANAN)	A2	213,9	6,69 (A3)	819
B (ANNA)	B4	216,6	3,64 (B1)	814
C (NAAN)	C1	92,4	4,1 (C3)	354

Tabel di atas menyajikan batas atas performa material yang dapat dicapai pada kondisi fabrikasi paling optimal dalam penelitian ini. Spesimen B4 mencatatkan tegangan lentur tertinggi secara keseluruhan sebesar 216,6 MPa, diikuti spesimen A2 sebesar 213,9 MPa, sementara spesimen terbaik variasi C (C1) hanya mencapai 92,4 MPa mengonfirmasi kembali keunggulan konfigurasi dengan aramid di lapisan terluar dalam menentukan kapasitas tegangan lentur maksimum. Modulus lentur tertinggi dicapai oleh variasi A pada spesimen A2 sebesar 6,69 GPa, mengonfirmasi keunggulan konfigurasi ANAN dalam menghasilkan kekakuan struktural yang optimal dibandingkan variasi B (3,64 GPa pada B1) maupun variasi C (4,1 GPa pada C3). Dari segi maximum load, variasi A mencatatkan beban tertinggi sebesar 819 N (A2), diikuti variasi B sebesar 814 N (B4), sedangkan variasi C hanya mencapai 354 N (C1). Adapun rentang data yang lebar pada setiap variasi tegangan lentur variasi A berkisar dari 77,84 hingga 213,9 MPa mengindikasikan variabilitas manufaktur yang tinggi, suatu karakteristik inheren proses hand lay-up pada komposit berbasis serat alam.

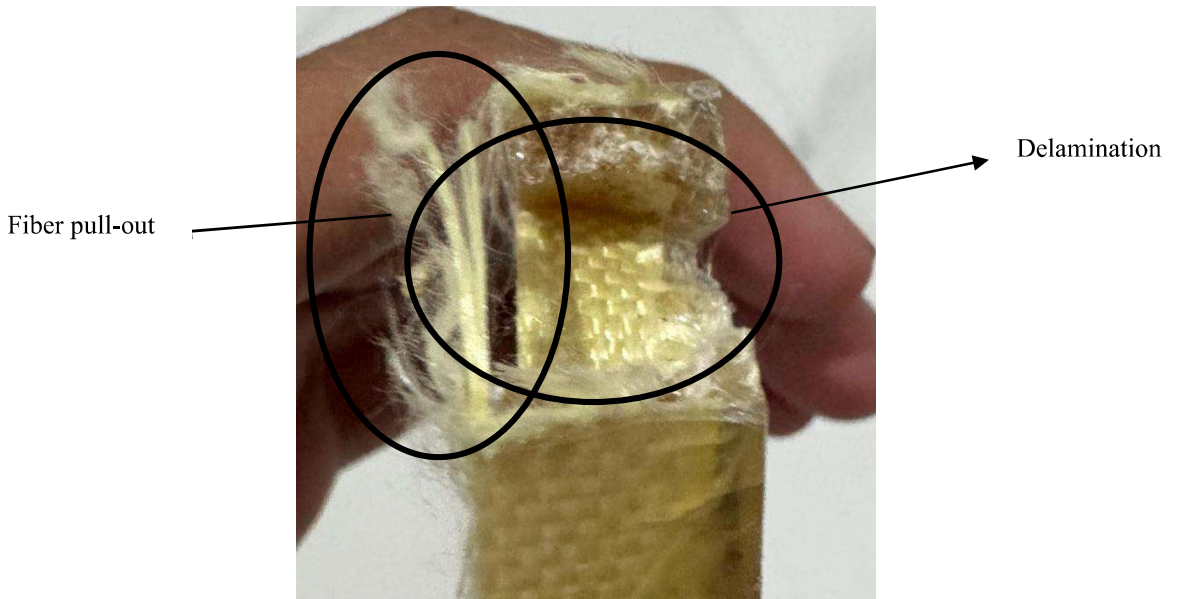
4.2.6 Identifikasi dan Dokumentasi Kegagalan

setelah seluruh spesimen menyelesaikan pengujian bending berdasarkan standar ISO 14125:1998, dengan tujuan mengamati dan mencatat pola kerusakan yang terbentuk akibat pembebanan lentur tiga titik. Pengamatan dilakukan secara visual makroskopik pada tiga area utama spesimen, yaitu permukaan atas dan bawah, penampang samping sepanjang ketebalan, serta bidang patahan apabila spesimen mengalami kegagalan total.

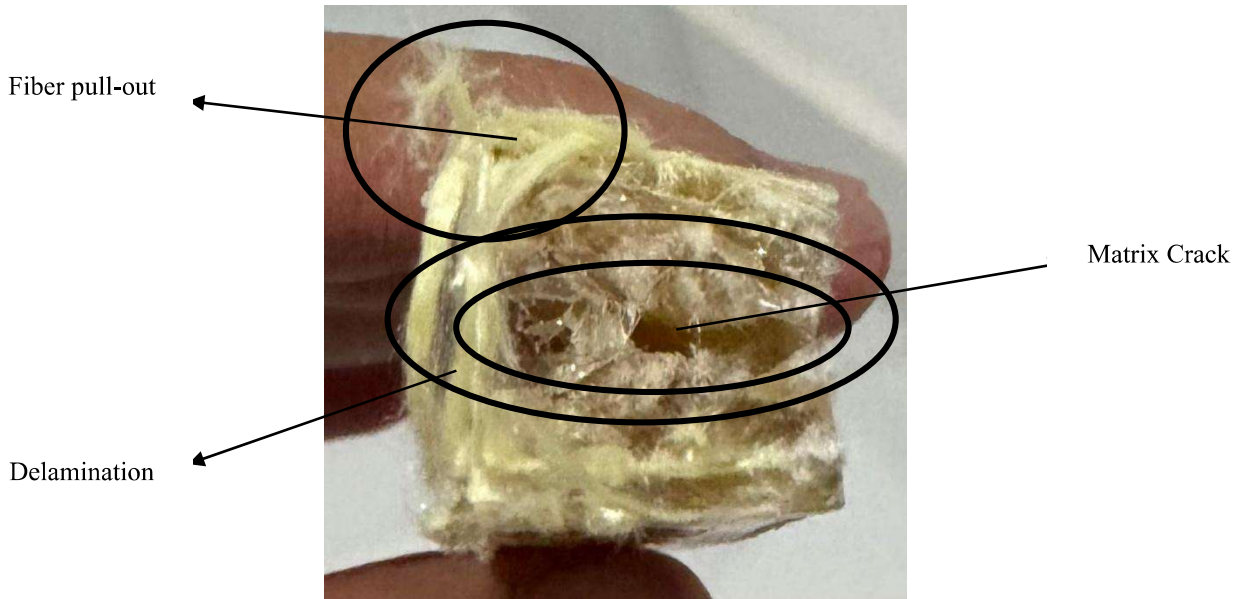
Mode kegagalan yang menjadi objek pengamatan dalam penelitian ini meliputi *delamination*, *matrix cracking*, *fiber pull-out*, *fiber fracture*, *fiber-matrix debonding*, *void/dry spot*, *kinking/buckling*, dan *interlaminar shear failure*. Masing-masing mode diidentifikasi berdasarkan karakteristik visualnya yang khas: *delamination* tampak sebagai pemisahan antar lapis pada penampang samping spesimen; *matrix cracking* terlihat sebagai garis retak tegak lurus di sisi tarik; *fiber pull-out* ditandai serat yang menonjol keluar dari bidang patahan; *fiber fracture* terlihat sebagai putusya serat secara langsung pada bidang patahan; *debonding* tampak sebagai area kusam atau kering di sekeliling serat yang terlepas dari matriks; *void* dan *dry spot* terlihat sebagai rongga atau area pucat akibat impregnasi resin yang tidak sempurna; *kinking* tampak sebagai tekukan serat di zona tekan; serta *interlaminar shear failure* terlihat sebagai retakan miring pada penampang samping di dekat titik tumpuan.



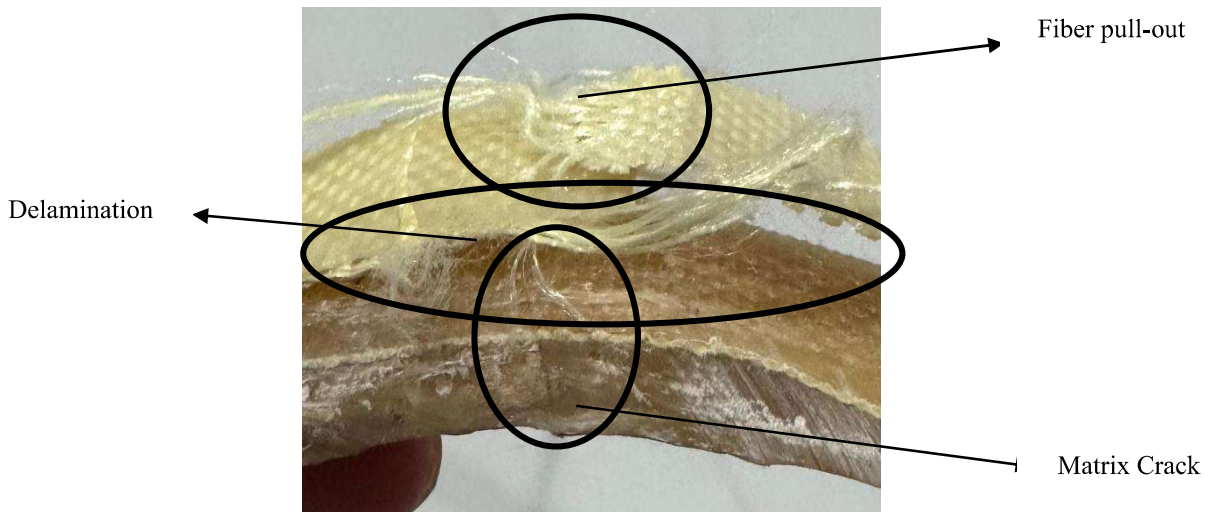
Gambar 4. 19 Hasil Pengujian Nilai Terendah Spesimen A (1)
(Sumber: Penulis, 2026)



Gambar 4. 18 Hasil Pengujian Nilai Tertinggi Spesimen A (2)
(Sumber: Penulis, 2026)



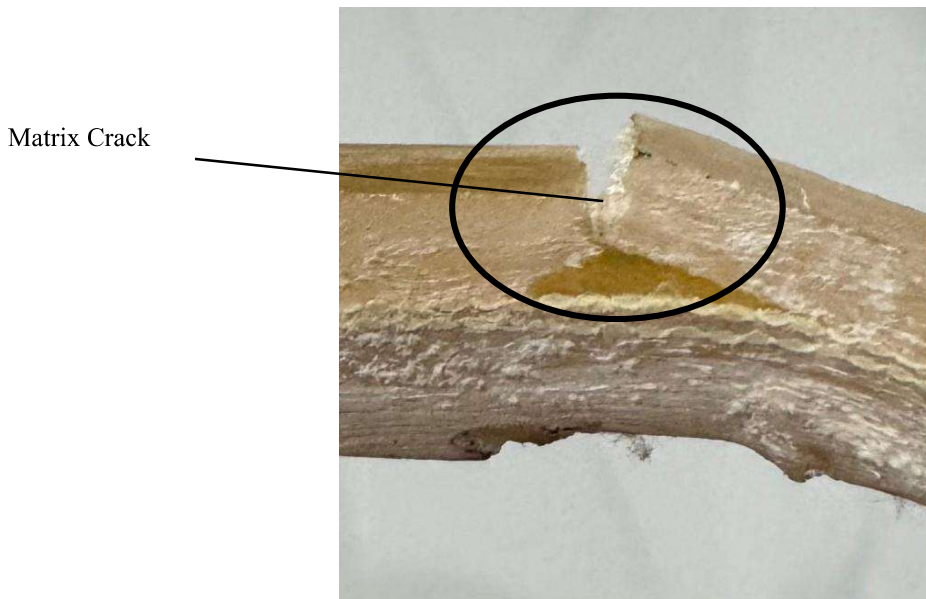
Gambar 4. 21 Hasil Pengujian Nilai Terendah Spesimen B (1)
 (Sumber: Penulis, 2026)



Gambar 4. 20 Hasil Pengujian Nilai Tertinggi Spesimen B (4)
 (Sumber: Penulis, 2026)



Gambar 4. 23 Hasil Pengujian Nilai Terendah Spesimen C (2)
(Sumber: Penulis, 2026)



Gambar 4. 22 Hasil Pengujian Nilai Tertinggi Spesimen C (1)
(Sumber: Penulis, 2026)

4.2.7 Potensi sebagai Material Alternatif Gading Kapal Ikan

Potensi komposit hibrida Aramid-Daun Nanas (PALF) sebagai material alternatif konstruksi kapal dilakukan berdasarkan BKI *Rules for Non-Metallic Materials, Part 1 Seagoing Ships, Volume XIV, July 2025 Edition*, khususnya *Section 2 Fiber Reinforced Plastics (FRP)*. Penilaian dilakukan menggunakan parameter hasil uji bending berupa tegangan lentur (*flexural strength*) dan modulus lentur (*flexural modulus*) yang dibandingkan dengan persyaratan material pada regulasi BKI.

Sebagai acuan validasi material, penelitian ini menggunakan BKI Vol. XIV Tabel 2.5 *Requirements for Chopped Strand Mat (CSM)*. Pemilihan tabel tersebut didasarkan pada kesamaan karakteristik proses fabrikasi dengan penelitian yang dilakukan, yaitu penggunaan metode hand lay-up serta pengujian sifat lentur (*flexural test*) menggunakan metode *three-point bending* sesuai standar ISO 14125:1998. Meskipun komposit yang diteliti menggunakan penguat hibrida serat aramid dan serat daun nanas (PALF), persyaratan pada Tabel 2.5 digunakan untuk mengevaluasi kelayakan minimum sifat lentur material hasil fabrikasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa komposit hibrida yang dikembangkan telah memenuhi persyaratan minimum *flexural strength* BKI sebesar 130 MPa, dimana nilai kekuatan lentur tertinggi yang diperoleh mencapai 216,6 MPa. Dengan demikian, material komposit hibrida aramid-PALF berbasis resin menunjukkan potensi untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai material alternatif struktur perahu nelayan.

Tabel 4. 23 Kriteria Penerimaan *Tensile and Flexural CSM* Berdasarkan BKI Vol. XIV (Sumber: BKI, 2025)

Table 2.5 Requirements for CSM		
<i>Property</i>²⁾	<i>Test method</i>¹⁾	<i>Acceptance criteria</i>
<i>Tensile strength</i>³⁾	ISO 527-4, 5	min. 80 MPa
<i>Tensile modulus</i>³⁾		min. 7000 MPa
<i>Flexural strength</i>³⁾	ISO 14125 (<i>method A</i> <i>(three-point flexure)</i>)	min. 130 MPa
<i>Flexural modulus</i>³⁾		min. 6000 MPa
1)	<i>Other methods or standards may be agreed upon with BKI prior to testing.</i>	
2)	<i>Tensile and flexural properties shall be stated in the certificate.</i>	
3)	<i>Test specimen shall be taken from panels made with a fibre weight content of 30% ± 4% and shall be verified according to ISO 1172. Test results, including information about the used resin and the curing conditions, shall be listed in the test report.</i>	

Tabel 4. 24 Hasil Perbandingan Spesimen dengan Rules BKI (Sumber: Penulis, 2026)

Parameter	Requirement	Hasil Penelitian	Persentase	Kategori
<i>Flexural strength</i>	130 MPa	216,6 MPa	166,6%	Memenuhi
<i>Flexural Modulus</i>	6000 MPa	6690 MPa	111,5%	Memenuhi

Berdasarkan perbandingan terhadap requirement BKI, hasil penelitian menunjukkan bahwa spesimen terbaik (B4 untuk tegangan lentur dan A2 untuk modulus lentur) telah memenuhi seluruh persyaratan mekanik yang ditetapkan. Nilai flexural strength tertinggi sebesar 216,6 MPa melampaui requirement 130 MPa dengan capaian 166,6%, sementara nilai flexural modulus tertinggi sebesar 6.690 MPa melampaui requirement 6.000 MPa dengan capaian 111,5%. Hal ini mengonfirmasi bahwa komposit hibrida PALF/arami berpotensi memenuhi persyaratan struktural untuk aplikasi rangka perahu nelayan sesuai standar BKI.