

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

4.1.1 Pembuatan Spesimen Bambu Laminasi

Pada penelitian ini, spesimen uji dibuat dari material serabut kelapa dan carbon fiber laminasi yang diproduksi sesuai dimensi pengujian tekan berdasarkan standar ASTM D3039 dan ASTM D7264 dengan metode *Three Point Bending*. Pada spesimen D3039 memiliki panjang 250 mm, lebar 25 mm, dan tebal 8 mm sedangkan Pada spesimen ASTM D7264 memiliki panjang 130 mm, lebar 13 mm, dan tebal 8 mm.



Gambar 4. 1 Spesimen Pengujian Sesuai ASTM D7264



Gambar 4. 2 Spesimenn Pengujian Sesuai ASTM D3039



Gambar 4. 3 Spesimen Pengujian Sesuai ASTM D3039

Penelitian ini dilaksanakan sebagai penelitian eksperimental laboratorium yang bertujuan untuk memperoleh data kuantitatif mengenai kekuatan tekan (compressive strength) komposit serabut kelapa dan carbon fiber yang dirancang sebagai material alternatif lambung perahu nelayan. Fokus utama penelitian ini adalah mengevaluasi pengaruh komposisi serabut kelapa terhadap matriks resin epoxy serta kualitas proses laminasi terhadap kinerja mekanik material, khususnya dalam menahan beban tekan.

Pembuatan material diawali dengan pembuatan spesimen memiliki ukuran yang sesuai dengan standart yang sudah ditetapkan. Dan material dibuat dengan bahan serabut kelapa dan carbon fiber laminasi. Dari beberapa spesimen uji diatas, maka diperoleh hasil-hasil berikut ini:

Tabel 4. 1 Spesimen Uji Three Point Bending Sesuai ASTM D7264

Sesuai dengan ASTM D7264	Spesimen	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)
	S1	130	13	8
	S2	130	13	8
	S3	130	13	8
	S4	130	13	8
	S5	130	13	8
	S6	130	13	8
	S7	130	13	8

Tabel 4. 2 Spesimen Uji Three Point Bending Sesuai ASTM D3039

Sesuai dengan ASTM D3039	Spesimen	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)
	T1	250	25	8
	T2	250	25	8
	T3	250	25	8
	T4	250	25	8
	T5	250	25	8
	T6	250	25	8
	T7	250	25	8

4.2 Pembahasan

Dalam pembahasan analisa data diperoleh dari hasil pengujian spesimen di Laboratorium Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro. Pengujian *Three Point Compressive Strength* dengan spesimen ini mengacu pada standart ASTM D3039 dan ASTM D7264.

Dari pengujian yang dilakukan dengan menggunakan mesin uji *Universal Testing Machine* (UTM). Maka didapatkan hasil daya tekan masing-masing komposit berdasarkan pengujian alat tersebut.

4.2.1 Hasil pengujian Three Point Bending

Tabel 4. 3 Hasil pengujian Three Point Bending sesuai ASTM D7264

Spesimen	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Tegangan Lentur (Mpa)	Modulus Elastisitas (Gpa)
S1	130	13	8	543,28	14,11
S2	130	13	8	453,28	20,63
S3	130	13	8	303,25	33,01
S4	130	13	8	112,05	18,32

S5	130	13	8	187,05	35,73
S6	130	13	8	168,75	20,63
S7	130	13	8	221,84	47,12

1. Pada spesimen dengan panjang 130 mm, lebar 13 mm dan tebal 8 mm yang menggunakan spesimen sesuai dengan ASTM D7264 pada saat pengujian *Three Point Bending* mendapatkan nilai Tegangan *Bending* 543,28 (MPa), Modulus Elastisitas sebesar 14.11 (GPa) dan Defleksi Maksimum sebesar 40 mm. Berdasarkan nilai beban tekan sebesar 2318 (N). Adapun hasil yang didapat berdasarkan perhitungan menggunakan rumus uji *Three Point Bending* adalah sebagai berikut:

a) Tegangan Lentur Maksimum (Flexural Stress)

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2}$$

$$= \frac{3 \times 2318 \times 130}{2 \times 13 \times 8^2}$$

$$= \frac{904,020}{1,664}$$

$$= 543,28 \text{ Mpa}$$

b) Modulus Elastisitas

$$E_f = \frac{L^3m}{4bd^3}$$

$$= \frac{130^3 \times 171 \text{ N/mm}}{4 \times 13 \times 8^3}$$

$$= \frac{375.687.000 \text{ N}}{26,624}$$

$$= 14,11 \text{ Gpa}$$

c) Regangan Lentur Maksimum (Flexural Strain)

$$\begin{aligned}\varepsilon_f &= \frac{6Dd}{L^2} \\ &= \frac{6 \times 40 \times 8}{130^2} \\ &= \frac{1,920}{16,900} \\ &= 0,113609 \\ &= 11,36 \%\end{aligned}$$

d) Defleksi Maksimum

$$\begin{aligned}D &= \frac{\varepsilon_f L^2}{6d} \\ &= \frac{0,113609 \times 16,900}{48} \\ &= \frac{1.919,9921}{48} \\ &= 40 \text{ mm}\end{aligned}$$

2. Pada spesimen dengan panjang 130 mm, lebar 13 mm dan tebal 8 mm yang menggunakan spesimen sesuai dengan ASTM D7264 pada saat pengujian *Three Point Bending* mendapatkan nilai Tegangan *Bending* 453,28 (MPa), Modulus Elastisitas sebesar 20,63 (GPa) dan Defleksi Maksimum sebesar 14,2 mm. Berdasarkan nilai beban tekan sebesar 1934 (N). Adapun hasil yang didapat berdasarkan perhitungan menggunakan rumus uji *Three Point Bending* adalah sebagai berikut:

a) Tegangan Lentur Maksimum (Flexural Stress)

$$\begin{aligned}\sigma_f &= \frac{3PL}{2bd^2} \\ &= \frac{3 \times 1934 \times 130}{2 \times 13 \times 8^2}\end{aligned}$$

$$= \frac{754.260}{1,664}$$

$$= 453,28 \text{ Mpa}$$

b) Modulus Elastisitas

$$E_f = \frac{L^3 m}{4bd^3}$$

$$= \frac{130^3 \times 250 \text{ N/mm}}{4 \times 13 \times 8^3}$$

$$= \frac{549.250.000 \text{ N}}{26,624}$$

$$= 20,63 \text{ Gpa}$$

c) Regangan Lentur Maksimum (Flexural Strain)

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2}$$

$$= \frac{6 \times 14,2 \times 8}{130^2}$$

$$= \frac{681,6}{16.900}$$

$$= 0,040331$$

$$= 4,03 \%$$

d) Defleksi Maksimum

$$D = \frac{\varepsilon_f L^2}{6d}$$

$$= \frac{0,040331 \times 16.900}{48}$$

$$= \frac{681,5939}{48}$$

$$= 14,2 \text{ mm}$$

e) Defleksi Maksimum

$$D = \frac{\varepsilon_f L^2}{6d}$$

$$= \frac{0,040331 \times 16.900}{48}$$

$$= \frac{681,5939}{48}$$

$$= 14,2 \text{ mm}$$

3. Pada spesimen dengan panjang 130 mm, lebar 13 mm dan tebal 8 mm yang menggunakan spesimen sesuai dengan ASTM D7264 pada saat pengujian Three Point Bending mendapatkan nilai Tegangan Bending 303,75 (MPa), Modulus Elastisitas sebesar 33,01 (GPa) dan Defleksi Maksimum sebesar 4,5 mm. Berdasarkan nilai beban tekan sebesar 1296 (N). Adapun hasil yang didapat berdasarkan perhitungan menggunakan rumus uji Three Point Bending adalah sebagai berikut:

a) Tegangan Lentur Maksimum (Flexural Stress)

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2}$$

$$= \frac{3 \times 1296 \times 130}{2 \times 13 \times 8^2}$$

$$= \frac{505.440}{1,664}$$

$$= 303,75 \text{ Mpa}$$

b) Modulus Elastisitas

$$E_f = \frac{L^3 m}{4bd^3}$$

$$= \frac{130^3 \times 400 \text{ N/mm}}{4 \times 13 \times 8^3}$$

$$= \frac{878.800.000 \text{ N}}{26,624}$$

$$= 33,01 \text{ GPa}$$

c) Regangan Lentur Maksimum (Flexural Strain)

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2}$$

$$= \frac{6 \times 4,5 \times 8}{130^2}$$

$$= \frac{216}{16.900}$$

$$= 0,012781$$

$$= 1,28 \%$$

d) Defleksi Maksimum

$$D = \frac{\varepsilon_f L^2}{6d}$$

$$= \frac{0,012781 \times 16.900}{48}$$

$$= \frac{216.0001}{48}$$

$$= 4,5 \text{ mm}$$

4. Pada spesimen dengan panjang 130 mm, lebar 13 mm dan tebal 8 mm yang menggunakan spesimen sesuai dengan ASTM D7264 pada saat pengujian Three Point Bending mendapatkan nilai Tegangan Bending 112,5 (MPa), Modulus Elastisitas sebesar 18,32 (GPa) dan Defleksi Maksimum sebesar 10,8 mm. Berdasarkan nilai beban tekan sebesar 480 (N). Adapun hasil yang didapat berdasarkan perhitungan

menggunakan rumus uji Three Point Bending adalah sebagai berikut:

a) Tegangan Lentur Maksimum (Flexural Stress)

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2}$$

$$= \frac{3 \times 480 \times 130}{2 \times 13 \times 8^2}$$

$$= \frac{187.200}{1,664}$$

$$= 112,5 \text{ Mpa}$$

b) Modulus Elastisitas

$$E_f = \frac{L^3m}{4bd^3}$$

$$= \frac{130^3 \times 222 \text{ N/mm}}{4 \times 13 \times 8^3}$$

$$= \frac{487.734.000 \text{ N}}{26,624}$$

$$= 18,32 \text{ Gpa}$$

c) Regangan Lentur Maksimum (Flexural Strain)

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2}$$

$$= \frac{6 \times 10,8 \times 8}{130^2}$$

$$= \frac{518,4}{16900}$$

$$= 0,030675$$

$$= 3,07 \%$$

d) Defleksi Maksimum

$$D = \frac{\varepsilon_f L^2}{6d}$$
$$= \frac{0,030675 \times 16.900}{48}$$
$$= \frac{518.4075}{48}$$
$$= 10,8 \text{ mm}$$

5. Pada spesimen dengan panjang 130 mm, lebar 13 mm dan tebal 8 mm yang menggunakan spesimen sesuai dengan ASTM D7264 pada saat pengujian Three Point Bending mendapatkan nilai Tegangan Bending 112,5 (MPa), Modulus Elastisitas sebesar 35,73 (GPa) dan Defleksi Maksimum sebesar 6,35 mm. Berdasarkan nilai beban tekan sebesar 800 (N). Adapun hasil yang didapat berdasarkan perhitungan menggunakan rumus uji Three Point Bending adalah sebagai berikut:

a) Tegangan Lentur Maksimum (Flexural Stress)

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2}$$
$$= \frac{3 \times 800 \times 130}{2 \times 13 \times 8^2}$$
$$= \frac{312.000}{1.664}$$
$$= 187,5 \text{ Mpa}$$

b) Modulus Elastisitas

$$E_f = \frac{L^3 m}{4bd^3}$$
$$= \frac{130^3 \times 433 \text{ N/mm}}{4 \times 13 \times 8^3}$$

$$= \frac{951.301.000 \text{ N}}{26,624}$$

$$= 35,73 \text{ Gpa}$$

c) Regangan Lentur Maksimum (Flexural Strain)

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2}$$

$$= \frac{6 \times 6,35 \times 8}{130^2}$$

$$= \frac{304,8}{16.900}$$

$$= 0,018036$$

$$= 1,80 \%$$

d) Defleksi Maksimum

$$D = \frac{\varepsilon_f L^2}{6d}$$

$$= \frac{0,018036 \times 16,900}{48}$$

$$= \frac{304,8084}{48}$$

$$= 6,35 \text{ mm}$$

6. Pada spesimen dengan panjang 130 mm, lebar 13 mm dan tebal 8 mm yang menggunakan spesimen sesuai dengan ASTM D7264 pada saat pengujian Three Point Bending mendapatkan nilai Tegangan Bending 168,75 (MPa), Modulus Elastisitas sebesar 20,63 (GPa) dan Defleksi Maksimum sebesar 6,45 mm. Berdasarkan nilai beban tekan sebesar 720 (N). Adapun hasil yang didapat berdasarkan perhitungan menggunakan rumus uji Three Point Bending adalah sebagai berikut:

a) Tegangan Lentur Maksimum (Flexural Stress)

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2}$$

$$= \frac{3 \times 720 \times 130}{2 \times 13 \times 8^2}$$

$$= \frac{280.000}{1,664}$$

$$= 168,75 \text{ Mpa}$$

b) Modulus Elastisitas

$$E_f = \frac{L^3m}{4bd^3}$$

$$= \frac{130^3 \times 250 \text{ N/mm}}{4 \times 13 \times 8^3}$$

$$= \frac{549.250.000 \text{ N}}{26,624}$$

$$= 20,63 \text{ Gpa}$$

c) Regangan Lentur Maksimum (Flexural Strain)

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2}$$

$$= \frac{6 \times 6,45 \times 8}{130^2}$$

$$= \frac{309,6}{16.900}$$

$$= 0,01832$$

$$= 1,83 \%$$

d) Defleksi Maksimum

$$D = \frac{\epsilon_f L^2}{6d}$$
$$= \frac{0,01832 \times 16.900}{48}$$
$$= \frac{309.608}{48}$$
$$= 6,45 \text{ mm}$$

7. Pada spesimen dengan panjang 130 mm, lebar 13 mm dan tebal 8 mm yang menggunakan spesimen sesuai dengan ASTM D7264 pada saat pengujian Three Point Bending mendapatkan nilai Tegangan Bending 221,48 (MPa), Modulus Elastisitas sebesar 47,12 (GPa) dan Defleksi Maksimum sebesar 5,16 mm. Berdasarkan nilai beban tekan sebesar 945 (N). Adapun hasil yang didapat berdasarkan perhitungan menggunakan rumus uji Three Point Bending adalah sebagai berikut:

a) Tegangan Lentur Maksimum (Flexural Stress)

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2}$$
$$= \frac{3 \times 945 \times 130}{2 \times 13 \times 8^2}$$
$$= \frac{368.550}{1664}$$
$$= 221,48 \text{ Mpa}$$

b) Modulus Elastisitas

$$E_f = \frac{L^3 m}{4bd^3}$$
$$= \frac{130^3 \times 571 \text{ N/mm}}{4 \times 13 \times 8^3}$$
$$= \frac{1.254.487 \text{ N}}{26,624}$$
$$= 47,12 \text{ GPa}$$

c) Regangan Lentur Maksimum (Flexural Strain)

$$\begin{aligned}\varepsilon_f &= \frac{6Dd}{L^2} \\ &= \frac{6 \times 5,16 \times 8}{130^2} \\ &= \frac{247,68}{16.900} \\ &= 0,0146556 \\ &= 1,47 \%\end{aligned}$$

d) Defleksi Maksimum

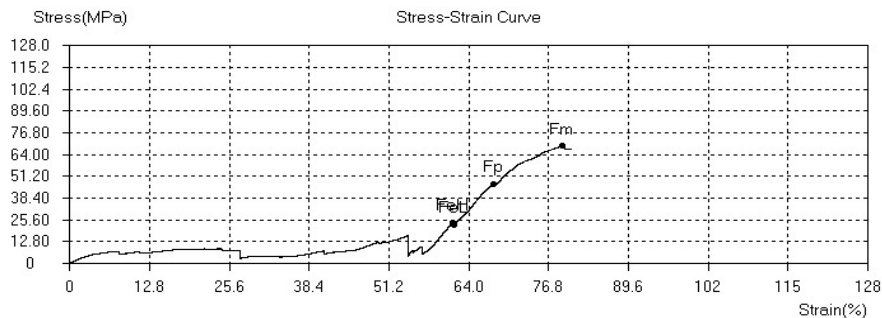
$$\begin{aligned}D &= \frac{\varepsilon_f L^2}{6d} \\ &= \frac{0,0146556 \times 16,900}{48} \\ &= \frac{247,67964}{48} \\ &= 5,16 \text{ mm}\end{aligned}$$

4.2.2 Pembahasan Pengujian Three Point Bending

Pada sub-bab ini dibahas hasil pengujian *Three Point Bending* terhadap spesimen komposit serabut kelapa dan carbon fiber laminasi dengan memberikan pengujian pada tiap – tiap spesimen. Pengujian dilakukan menggunakan mesin *Universal Testing Machine* (UTM) dengan metode *three-point bending* di Laboratorium Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro.

1. Spesimen 1

Tegangan dan regangan yang diterima oleh benda spesimen memiliki besaran yang berbeda disetiap pertambahan ukurannya . Data mengenai hubungan antara tegangan dan regangan dapat ditemukan pada gambar dibawah ini.



Gambar 4. 4 Grafik Tegangan dan Regangan Hasil Uji Spesimen 1

Keterangan :

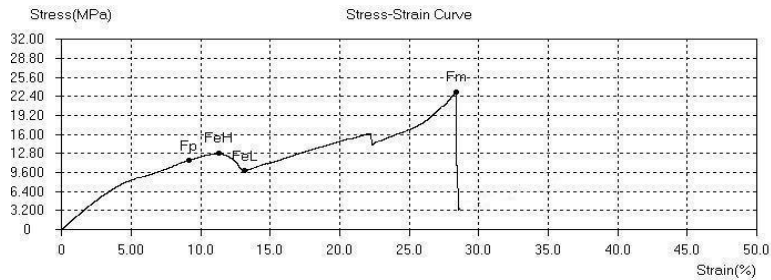
Tabel 4. 4 Tegangan dan Regangan Spesimen 1

Parameter	Nilai
Elastic limit	12,8 MPa
FeH	25,6 MPa
FeL	23 MPa
Fp	46 MPa
Fm (maksimum)	68 MPa
Strain Maksimum	79 %

Berdasarkan data teknis tersebut, material menunjukkan batas elastis (elastic limit) pada kisaran 12,8 MPa dengan tegangan luluh atas (FeH) sebesar 25,6 MPa dan tegangan luluh bawah (FeL) sebesar 23 MPa, sementara titik proporsional (Fp) terdeteksi pada 46 MPa dan tegangan maksimum (Fm) mencapai 68 MPa dengan regangan maksimum yang sangat tinggi sebesar 79%, sehingga hasil ini menunjukkan bahwa spesimen memiliki daktilitas yang sangat baik karena mampu mengalami deformasi plastis yang luas sebelum patah, disertai fenomena strain hardening yang kuat akibat selisih besar antara tegangan luluh dan tegangan maksimum, yang menandakan adanya penguatan struktur internal material selama proses pembebanan, serta menunjukkan ketangguhan material yang tinggi karena mampu menyerap energi dalam jumlah besar sebelum mengalami kegagalan.

2. Spesimen 2

Tegangan dan regangan yang diterima oleh benda spesimen memiliki besaran yang berbeda disetiap pertambahan ukurannya . Data mengenai hubungan antara tegangan dan regangan dapat ditemukan pada gambar dibawah ini.



Gambar 4. 5 Grafik Tegangan dan Regangan Hasil Uji Spesimen 2

Keterangan :

Tabel 4. 5 Tegangan dan Regangan Spesimen 2

Parameter	Nilai
Elastic limit	12.8 MPa
FeH	12,8 MPa
FeL	9.8 MPa
Fp	11,5 MPa
Fm (maksimum)	23.2 MPa
Strain Maksimum	28.5 %

Material menunjukkan batas elastis (elastic limit) dan tegangan luluh atas (FeH) pada kisaran 12,8 MPa yang menandakan transisi sangat tajam dari fase elastis ke plastis, kemudian terjadi penurunan tegangan hingga tegangan luluh bawah (FeL) sebesar 9,8 MPa akibat fenomena yield point drop sebelum mengalami strain hardening, sementara tegangan maksimum (Fm) tercapai pada 23,2 MPa dengan regangan maksimum sebesar 28,5%, sehingga hasil ini menunjukkan bahwa material memiliki duktilitas yang baik karena mampu mengalami deformasi plastis lebih dari 25% sebelum gagal dan layak diaplikasikan pada komponen yang membutuhkan kemampuan penyerapan energi deformasi tinggi tanpa mengalami patah getas.

3. Spesimen 3

Tegangan dan regangan yang diterima oleh benda spesimen memiliki besaran yang berbeda disetiap pertambahan ukurannya . Data mengenai hubungan antara tegangan dan regangan dapat ditemukan pada gambar dibawah ini.



Gambar 4. 6 Grafik Tegangan dan Reganga Hasil Uji Bending Spesimen 3

Keterangan :

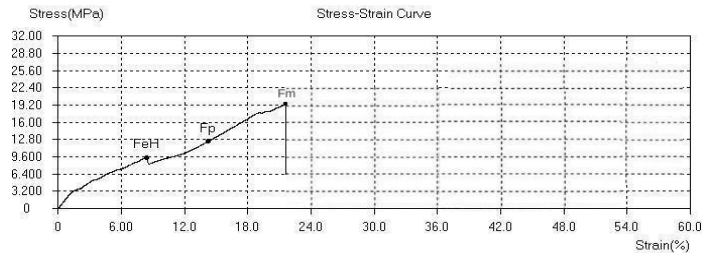
Tabel 4. 6 Tegangan dan Regangan Spesimen 3

Parameter	Nilai
Elastic limit	4,8 MPa
FeH	7,5 MPa
FeL	7.2 MPa
Fp	4 MPa
Fm (maksimum)	8 MPa
Strain Maksimum	9 %

Berdasarkan grafik pengujian, material memiliki batas elastis sebesar 4,8 MPa dengan tegangan luluh atas (FeH) mencapai 7,5 MPa dan tegangan luluh bawah (FeL) sebesar 7,2 MPa, sementara titik proporsional (Fp) terdeteksi pada 4 MPa dan tegangan maksimum (Fm) hanya mencapai 8 MPa dengan regangan maksimum sebesar 9%, sehingga hasil ini menunjukkan bahwa spesimen cenderung mengalami kegagalan getas (brittle) dibandingkan spesimen pertama karena memiliki regangan maksimum yang rendah dan selisih yang sangat sempit antara tegangan luluh dan tegangan maksimum, menandakan fase strain hardening yang sangat singkat sehingga material akan segera mengalami patah setelah melewati titik luluhnya, oleh karena itu spesimen ini kurang sesuai untuk komponen yang membutuhkan fleksibilitas tetapi masih berpotensi digunakan pada aplikasi dengan beban statis rendah yang memerlukan kekakuan tinggi.

4. Spesimen 4

Tegangan dan regangan yang diterima oleh benda spesimen memiliki besaran yang berbeda disetiap pertambahan ukurannya . Data mengenai hubungan antara tegangan dan regangan dapat ditemukan pada gambar dibawah ini.



Gambar 4. 7 Grafik Tegangan dan Regangan Hasil Uji Bending Spesimen 4

Keterangan :

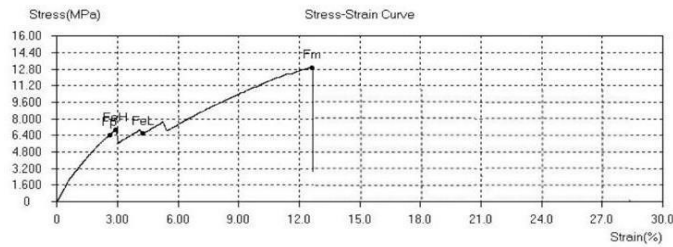
Tabel 4. 7 Tegangan dan Regangan Spesimen 4

Parameter	Nilai
Elastic limit	3,2 MPa
FeH	9 MPa
FeL	8,2 MPa
Fp	12,8 MPa
Fm (maksimum)	19,4 MPa
Strain Maksimum	21 %

Berdasarkan data teknis tersebut, material menunjukkan batas elastis (elastic limit) pada kisaran 3,2 MPa dengan tegangan luluh atas (FeH) sebesar 9 MPa dan tegangan luluh bawah (FeL) sebesar 8,2 MPa, sementara titik proporsional (Fp) terdeteksi pada 12,8 MPa dan tegangan maksimum (Fm) mencapai 19,4 MPa dengan regangan maksimum sebesar 21%, sehingga hasil ini menunjukkan bahwa spesimen memiliki perilaku deformasi plastis yang stabil dengan tingkat daktilitas moderat karena mampu mengalami peregangan yang cukup baik sebelum gagal, disertai adanya fenomena strain hardening yang terlihat dari kenaikan tegangan signifikan setelah melewati titik luluh hingga mencapai tegangan maksimum, serta menunjukkan transisi luluh yang jelas akibat fenomena yield point phenomenon yang menandakan pelepasan dislokasi pada struktur mikro material saat memasuki fase deformasi permanen.

5. Spesimen 5

Tegangan dan regangan yang diterima oleh benda spesimen memiliki besaran yang berbeda disetiap pertambahan ukurannya . Data mengenai hubungan antara tegangan dan regangan dapat ditemukan pada gambar dibawah ini.



Gambar 4. 8 Grafik Tegangan dan Regangan Hasil Uji Bending Spesimen 5

Keterangan :

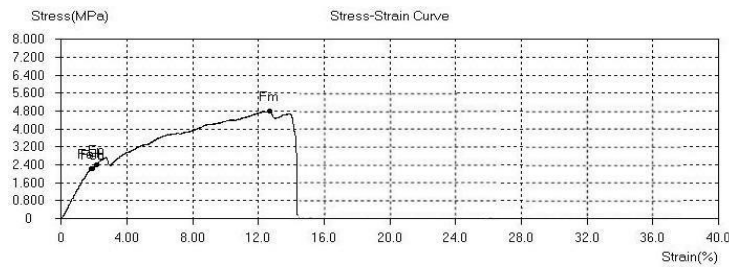
Tabel 4. 8 Tegangan dan Regangan Spesimen 5

Parameter	Nilai
Elastic limit	6,8 MPa
FeH	7,2 MPa
FeL	6,4 MPa
Fp	6,4 MPa
Fm (maksimum)	12,8 MPa
Strain Maksimum	12,6 %

Berdasarkan data teknis tersebut, material menunjukkan batas elastis (elastic limit) pada kisaran 6,8 MPa dengan tegangan luluh atas (FeH) sebesar 7,2 MPa dan tegangan luluh bawah (FeL) sebesar 6,4 MPa, sementara titik proporsional (Fp) berada pada nilai yang sama dengan luluh bawah yaitu 6,4 MPa dan tegangan maksimum (Fm) mencapai 12,8 MPa dengan regangan maksimum sebesar 12,6%, sehingga hasil ini menunjukkan bahwa spesimen mengalami deformasi plastis yang terbatas dengan kecenderungan bersifat semi-getas (semi-brittle) karena memiliki daktilitas rendah dan kemampuan regang yang terbatas sebelum patah, disertai ruang strain hardening yang relatif sempit setelah melewati titik luluh hingga mencapai kegagalan, serta menunjukkan stabilitas luluh yang baik akibat nilai FeL dan Fp yang identik sehingga batas proporsional linear material berakhir tepat pada saat terjadinya fenomena luluh bawah dengan transisi beban yang relatif konstan selama deformasi awal.

6. Spesimen 6

Tegangan dan regangan yang diterima oleh benda spesimen memiliki besaran yang berbeda disetiap pertambahan ukurannya . Data mengenai hubungan antara tegangan dan regangan dapat ditemukan pada gambar dibawah ini.



Gambar 4. 9 Grafik Tegangan dan Regangan Hasil Uji Bending Spesien 6

Keterangan :

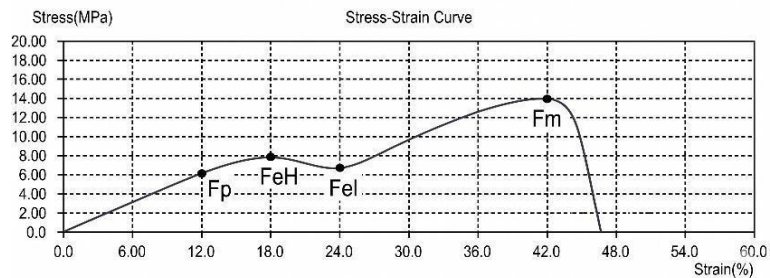
Tabel 4. 9 Tegangan dan Regangan Spesimen 6

Parameter	Nilai
Elastic limit	2,4 MPa
FeH	2,8 MPa
FeL	2,4 MPa
Fp	2,2 MPa
Fm (maksimum)	4,8 MPa
Strain Maksimum	36,5 %

Berdasarkan data teknis tersebut, material menunjukkan batas elastis (elastic limit) pada kisaran 2,4 MPa yang bertepatan dengan tegangan luluh bawah (FeL) sebesar 2,4 MPa, dengan tegangan luluh atas (FeH) sebesar 2,8 MPa dan titik proporsional (Fp) pada 2,2 MPa, sementara tegangan maksimum (Fm) mencapai 4,8 MPa dengan regangan maksimum yang cukup tinggi sebesar 36,5%, sehingga hasil ini menunjukkan bahwa spesimen memiliki sifat sangat ulet (ductile) dengan kemampuan deformasi plastis yang tinggi sebelum mengalami kegagalan, meskipun memiliki kekuatan tarik yang relatif rendah karena nilai tegangan maksimumnya kecil, serta masih menunjukkan fenomena strain hardening yang ditandai oleh peningkatan tegangan dari titik luluh menuju tegangan maksimum akibat kemampuan material memperkuat struktur internalnya selama proses deformasi.

7. Spesimen 7

Tegangan dan regangan yang diterima oleh benda spesimen memiliki besaran yang berbeda disetiap pertambahan ukurannya . Data mengenai hubungan antara tegangan dan regangan dapat ditemukan pada gambar dibawah ini.



Gambar 4. 10 Grafik Tegangan dan Regangan Hasil Uji Bending Spesimen 7

Keterangan :

Tabel 4. 10 Tegangan dan Regangan Spesimen 7

Parameter	Nilai
Elastic limit	2.4 MPa
FeH	10.4 MPa
FeL	9.6 MPa
Fp	6.4 MPa
Fm (maksimum)	12.8 MPa
Strain Maksimum	15.20 %

Berdasarkan data teknis tersebut, material menunjukkan batas elastis (*elastic limit*) pada kisaran 2,4 MPa dengan titik proporsional (F_p) sebesar 6,4 MPa. Karakteristik luluh material teramati jelas melalui tegangan luluh atas (F_{eH}) sebesar 10,4 MPa yang kemudian menurun menjadi tegangan luluh bawah (F_{eL}) sebesar 9,6 MPa, menandakan terjadinya fenomena *yielding* akibat pergeseran dislokasi yang berlangsung relatif seragam dalam struktur mikro material. Setelah melewati fase luluh, tegangan kembali meningkat hingga mencapai tegangan maksimum (F_m) sebesar 12,8 MPa, yang menunjukkan adanya fenomena *strain hardening* atau penguatan regangan, yaitu kondisi ketika material menjadi lebih kuat dan keras selama deformasi plastis berlangsung. Nilai regangan maksimum sebesar 15,20% mengindikasikan bahwa material memiliki tingkat daktilitas menengah, sehingga tidak bersifat getas namun juga tidak sangat ulet, karena masih mampu mengalami deformasi yang cukup signifikan sebelum mengalami kegagalan total.

4.2.3 Hasil Pengujian Tensile

Tabel 4. 11 Hasil pengujian Tensile ASTM D3039

Spesimen	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Tegangan Tarik (Mpa)	Modulus Elastisitas (Gpa)
T1	130	13	8	7,048	0,680
T2	130	13	8	16,36	0,908
T3	130	13	8	2,050	0,416
T4	130	13	8	11,36	0,792
T5	130	13	8	32,36	0,597
T6	130	13	8	4,014	0,614
T7	130	13	8	8,092	0,477

1. Pada spesimen dengan panjang 250 mm, lebar 25 mm dan tebal 4 mm yang menggunakan spesimen sesuai dengan ASTM D3039 pada saat pengujian Tensile mendapatkan nilai Tegangan Tarik Maksimum 7,48 (MPa), Regangan Tarik Maksimum sebesar 1,1% dan Modulus Elastisitas sebesar 0,680 (GPa). Berdasarkan nilai beban tekan sebesar 748 (N). Adapun hasil yang didapat berdasarkan perhitungan menggunakan rumus uji Tensile adalah sebagai berikut:

a) Luas Penampang

$$A_0 = b \times h$$

$$A_0 = 25 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$$

$$A_0 = 100 \text{ mm}^2$$

b) Tegangan Tarik Maksimum

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

$$\sigma = \frac{748 \text{ N}}{100 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma = 7,48 \text{ MPa}$$

c) Regangan Tarik Maksimum

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\%$$

$$\epsilon = \frac{1,65 \text{ mm}}{150 \text{ mm}} \times 100\%$$

$$\epsilon = 0,011 \times 100\%$$

$$\epsilon = 1,1\%$$

d) Modulus Elastisitas

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

$$E = \frac{7,48 \text{ MPa}}{0,011}$$

$$E = 0,680 \text{ GPa}$$

2. Pada spesimen dengan panjang 250 mm, lebar 25 mm dan tebal 4 mm yang menggunakan spesimen sesuai dengan ASTM D3039 pada saat pengujian Tensile mendapatkan nilai Tegangan Tarik Maksimum 16,36 (MPa), Regangan Tarik Maksimum sebesar 1,8% dan Modulus Elastisitas sebesar 0,908 (GPa). Berdasarkan nilai beban tekan sebesar 1636 (N). Adapun hasil yang didapat berdasarkan perhitungan menggunakan rumus uji Tensile adalah sebagai berikut:

a) Luas Penampang

$$A_0 = b \times h$$

$$A_0 = 25 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$$

$$A_0 = 100 \text{ mm}^2$$

b) Tegangan Tarik Maksimum

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

$$\sigma = \frac{1636 \text{ N}}{100 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma = 16,36 \text{ MPa}$$

c) Regangan Tarik Maksimum (Displacement Maximum)

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\%$$

$$\epsilon = \frac{2,70 \text{ mm}}{150 \text{ mm}}$$

$$\epsilon = 0,018 \times 100\%$$

$$\epsilon = 1,8\%$$

d) Modulus Elastisitas

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

$$E = \frac{16,36 \text{ MPa}}{0,018}$$

$$E = 0,908 \text{ GPa}$$

3. Pada spesimen dengan panjang 250 mm, lebar 25 mm dan tebal 4 mm yang menggunakan spesimen sesuai dengan ASTM D3039 pada saat pengujian Tensile mendapatkan nilai Tegangan Tarik Maksimum 2,5 (MPa), Regangan Tarik Maksimum sebesar 0,6% dan Modulus Elastisitas sebesar 0,416 (GPa). Berdasarkan nilai beban tekan sebesar 250 (N). Adapun hasil yang didapat berdasarkan perhitungan menggunakan rumus uji Tensile adalah sebagai berikut:

a) Luas Penampang

$$A_0 = b \times h$$

$$A_0 = 25 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$$

$$A_0 = 100 \text{ mm}^2$$

b) Tegangan Tarik Maksimum

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

$$\sigma = \frac{250 \text{ N}}{100 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma = 2,5 \text{ MPa}$$

c) Regangan Tarik Maksimum (Displacement Maximum)

$$\epsilon = \frac{\Delta}{L_0} \times 100\%$$

$$\epsilon = \frac{0,90 \text{ mm}}{150 \text{ mm}}$$

$$\epsilon = 0,006 \times 100\%$$

$$\epsilon = 0,6 \%$$

d) Modulus Elastisitas

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

$$E = \frac{2,5 \text{ MPa}}{0,006}$$

$$E = 0,416 \text{ GPa}$$

4. Pada spesimen dengan panjang 250 mm, lebar 25 mm dan tebal 4 mm yang menggunakan spesimen sesuai dengan ASTM D3039 pada saat pengujian Tensile mendapatkan nilai Tegangan Tarik Maksimum 11,36 (MPa), Regangan Tarik Maksimum sebesar 1,433% dan Modulus Elastisitas sebesar 0,792 (GPa). Berdasarkan nilai beban tekan sebesar 1136 (N). Adapun hasil yang didapat berdasarkan perhitungan menggunakan rumus uji Tensile adalah sebagai berikut:

a) Luas Penampang

$$A_0 = b \times h$$

$$A_0 = 25 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$$

$$A_0 = 100 \text{ mm}^2$$

b) Tegangan Tarik Maksimum

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

$$\sigma = \frac{1136 \text{ N}}{100 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma = 11,36 \text{ MPa}$$

c) Regangan Tarik Maksimum (Displacement Maximum)

$$\epsilon = \frac{\Delta}{L_0} \times 100\%$$

$$\epsilon = \frac{2,15 \text{ mm}}{150 \text{ mm}}$$

$$\epsilon = 0,01433 \times 100\%$$

$$\epsilon = 1,433 \%$$

d) Modulus Elastisitas

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

$$E = \frac{11,36 \text{ MPa}}{0,014333}$$

$$E = 0,792 \text{ GPa}$$

5. Pada spesimen dengan panjang 250 mm, lebar 25 mm dan tebal 4 mm yang menggunakan spesimen sesuai dengan ASTM D3039 pada saat pengujian Tensile mendapatkan nilai Tegangan Tarik Maksimum 32,36 (MPa), Regangan Tarik Maksimum sebesar 5,4% dan Modulus Elastisitas sebesar 0,597 (GPa). Berdasarkan nilai beban tekan sebesar 3226 (N). Adapun hasil yang didapat berdasarkan perhitungan menggunakan rumus uji Tensile adalah sebagai berikut:

a) Luas Penampang

$$A_0 = b \times h$$

$$A_0 = 25 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$$

$$A_0 = 100 \text{ mm}^2$$

b) Tegangan Tarik Maksimum

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

$$= \frac{3226 \text{ N}}{100 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma = 32,26 \text{ MPa}$$

c) Regangan Tarik Maksimum (Displacement Maximum)

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\%$$

$$\epsilon = \frac{8,10 \text{ mm}}{150 \text{ mm}}$$

$$\epsilon = 0,054 \times 100\%$$

$$\epsilon = 5,4 \%$$

d) Modulus Elastisitas

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

$$E = \frac{32,26 \text{ MPa}}{0,054}$$

$$E = 0,597 \text{ GPa}$$

6. Pada spesimen dengan panjang 250 mm, lebar 25 mm dan tebal 4 mm yang menggunakan spesimen sesuai dengan ASTM D3039 pada saat pengujian Tensile mendapatkan nilai Tegangan Tarik Maksimum 4,14 (MPa), Regangan Tarik Maksimum sebesar 0,673% dan Modulus Elastisitas sebesar 0,614 (GPa). Berdasarkan nilai beban tekan sebesar 414 (N). Adapun hasil yang didapat berdasarkan perhitungan menggunakan rumus uji Tensile adalah sebagai berikut:

a) Luas Penampang

$$A_0 = b \times h$$

$$A_0 = 25 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$$

$$A_0 = 100 \text{ mm}^2$$

b) Tegangan Tarik Maksimum

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

$$\sigma = \frac{414 \text{ N}}{100 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma = 4,14 \text{ MPa}$$

c) Regangan Tarik Maksimum (Displacement Maximum)

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\%$$

$$\epsilon = \frac{1,01 \text{ mm}}{150 \text{ mm}}$$

$$\epsilon = 0,00673 \times 100\%$$

$$\epsilon = 0,673\%$$

d) Modulus Elastisitas

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

$$E = \frac{4,14 \text{ MPa}}{0,006733}$$

$$E = 0,614 \text{ GPa}$$

7. Pada spesimen dengan panjang 250 mm, lebar 25 mm dan tebal 4 mm yang menggunakan spesimen sesuai dengan ASTM D3039 pada saat pengujian Tensile mendapatkan nilai Tegangan Tarik Maksimum 8,92 (MPa), Regangan Tarik Maksimum sebesar 1,87% dan Modulus Elastisitas sebesar 0,477 (GPa). Berdasarkan nilai beban tekan sebesar 892 (N). Adapun hasil yang didapat berdasarkan perhitungan menggunakan rumus uji Tensile adalah sebagai berikut:

a) Luas Penampang

$$A_0 = b \times h$$

$$A_0 = 25 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$$

$$A_0 = 100 \text{ mm}^2$$

b) Tegangan Tarik Maksimum

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

$$\sigma = \frac{892 \text{ N}}{100 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma = 8,92 \text{ MPa}$$

c) Regangan Tarik Maksimum (Displacement Maximum)

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\%$$

$$\epsilon = \frac{2,8 \text{ mm}}{150 \text{ mm}}$$

$$\epsilon = 0,0187 \times 100\%$$

$$\epsilon = 1,87\%$$

d) Modulus Elastisitas

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

$$E = \frac{8,92 \text{ MPa}}{0,0187}$$

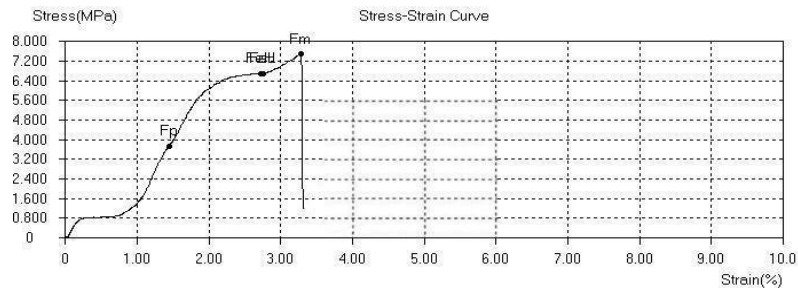
$$E = 0,477 \text{ GPa}$$

4.2.4 Pembahasan Pengujian Tensile

Pada sub-bab ini dibahas hasil pengujian Tensile terhadap spesimen komposit serabut kelapa dan carbon fiber laminasi dengan memberikan pengujian pada tiap – tiap spesimen. Pengujian dilakukan menggunakan mesin Universal Testing Machine (UTM) dengan metode three-point bending di Laboratorium Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro.

1. Spesimen 1

Besaran tegangan dan regangan yang diterima oleh spesimen mengalami perubahan seiring dengan peningkatan beban tarik yang diberikan. Hubungan karakteristik antara tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) tersebut dapat diamati melalui grafik di bawah ini.



Gambar 4. 11 Grafik Tegangan dan Regangan Hasil Uji Tensile Spesimen 1

Keterangan :

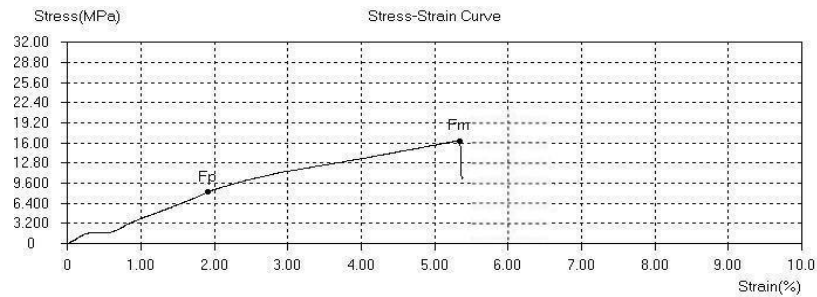
Tabel 4. 12 Tegangan dan Regangan Spesimen 1

Parameter	Nilai
Elastic limit	0,8 MPa
FeH	6,8 MPa
FeL	6,6 MPa
Fp	3,6 MPa
Fm (maksimum)	7,6 MPa
Strain Maksimum	3,30 %

Berdasarkan data teknis tersebut, material menunjukkan batas elastis (elastic limit) pada kisaran 0,8 MPa dengan karakteristik luluh yang ditandai oleh tegangan luluh atas (FeH) sebesar 6,8 MPa dan tegangan luluh bawah (FeL) sebesar 6,6 MPa, sementara titik proporsional (Fp) berada pada 3,6 MPa dan tegangan maksimum (Fm) mencapai 7,6 MPa dengan regangan maksimum yang sangat rendah yaitu 3,30%, sehingga menunjukkan perilaku kegagalan getas (brittle failure) yang ekstrem, ditandai oleh daktilitas yang sangat rendah karena material hampir tidak mengalami deformasi plastis sebelum patah, rentang yang sangat sempit antara tegangan luluh dan tegangan maksimum yang mengindikasikan kemampuan strain hardening yang minim, serta nilai ketangguhan (toughness) yang rendah akibat kecilnya area di bawah kurva tegangan-regangan sehingga material tidak mampu menyerap energi dalam jumlah besar sebelum mengalami patah total.

2. Spesimen 2

Besaran tegangan dan regangan yang diterima oleh spesimen mengalami perubahan seiring dengan peningkatan beban tarik yang diberikan. Hubungan karakteristik antara tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) tersebut dapat diamati melalui grafik di bawah ini.



Gambar 4. 12 Grafik Tegangan dan Regangan Hasil Uji Tensile Spesimen 2

Keterangan :

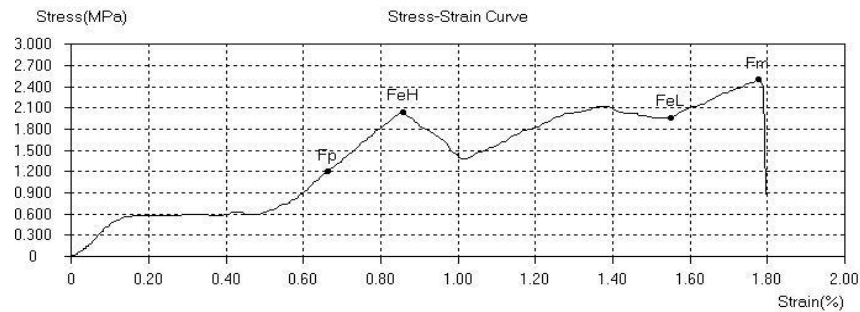
Tabel 4. 13 Tegangan dan Regangan Spesimen 2

Parameter	Nilai
Elastic limit	1.6 MPa
FeH	12.8 MPa
FeL	11.2 MPa
Fp	8.2 MPa
Fm (maksimum)	16.2 MPa
Strain Maksimum	5.30 %

Berdasarkan data teknis tersebut, material menunjukkan batas elastis (elastic limit) pada kisaran 1,6 MPa dengan titik proporsional (F_p) sebesar 8,2 MPa, tegangan luluh atas (F_{eH}) mencapai 12,8 MPa, tegangan luluh bawah (F_{eL}) sebesar 11,2 MPa, serta tegangan maksimum (F_m) sebesar 16,2 MPa dengan regangan maksimum yang relatif rendah yaitu 5,30%; kondisi ini mengindikasikan bahwa spesimen mengalami perilaku getas (brittle) yang signifikan, ditandai oleh daktilitas rendah sehingga material hanya mengalami deformasi plastis yang sangat kecil dan cenderung patah secara tiba-tiba setelah melewati titik luluh, adanya transisi ekstrem dari daerah elastis ke plastis yang menunjukkan struktur material sangat kaku namun cepat kehilangan integritas setelah melewati batas elastisitas, serta kemampuan penyerapan energi yang rendah (low toughness) akibat regangan maksimum yang pendek, yang umumnya disebabkan oleh karakteristik material keras tetapi rapuh seperti keramik, besi cor, atau polimer dengan ikatan silang sangat padat.

3. Spesimen 3

Besaran tegangan dan regangan yang diterima oleh spesimen mengalami perubahan seiring dengan peningkatan beban tarik yang diberikan. Hubungan karakteristik antara tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) tersebut dapat diamati melalui grafik di bawah ini.



Gambar 4. 13 Grafik Tegangan dan Regangan Hasil Uji Tensile Spesimen 3

Keterangan:

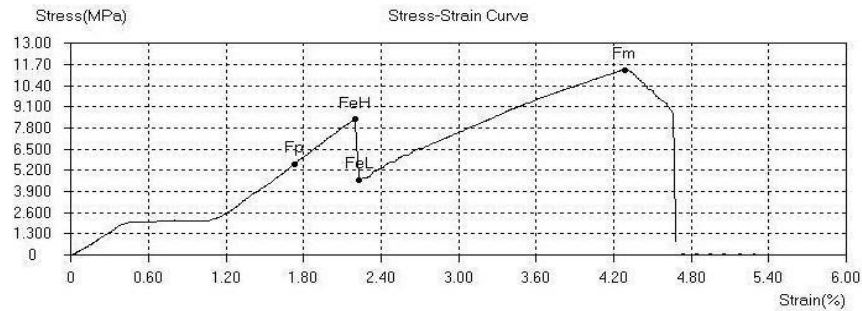
Tabel 4. 14 Tegangan dan Regangan Spesimen 3

Parameter	Nilai
Elastic limit	0.6 MPa
FeH	2,05 MPa
FeL	1.95 MPa
Fp	1.2 MPa
Fm (maksimum)	2.5 MPa
Strain Maksimum	1.80 %

Berdasarkan data teknis tersebut, material menunjukkan batas elastis (elastic limit) yang sangat rendah pada kisaran 0,6 MPa dengan titik proporsional (Fp) sebesar 1,2 MPa, tegangan luluh atas (FeH) mencapai 2,05 MPa, tegangan luluh bawah (FeL) sebesar 1,95 MPa, serta tegangan maksimum (Fm) sebesar 2,5 MPa dengan regangan maksimum yang sangat minimal yaitu 1,80%; kondisi ini menunjukkan bahwa spesimen pada tabel di atas mengalami kegagalan getas (brittle failure) yang sangat ekstrem dan memiliki kekuatan struktural yang sangat rendah, ditandai oleh sifat sangat getas sehingga material hampir tidak memiliki kemampuan deformasi plastis dan akan patah secara mendadak setelah melewati titik luluh tanpa adanya peregangan yang signifikan, kekuatan mekanik yang rendah karena hanya mampu menahan beban kecil dibandingkan spesimen lainnya, serta ketangguhan (toughness) yang sangat minimal akibat kombinasi tegangan rendah dan regangan pendek sehingga kemampuan penyerapan energinya hampir nol sebelum mengalami kegagalan total, yang umumnya ditemukan pada material rapuh seperti busa kaku, keramik kualitas rendah, atau polimer yang telah mengalami degradasi berat.

4. Spesimen 4

Besaran tegangan dan regangan yang diterima oleh spesimen mengalami perubahan seiring dengan peningkatan beban tarik yang diberikan. Hubungan karakteristik antara tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) tersebut dapat diamati melalui grafik di bawah ini.



Gambar 4. 14 Grafik Tegangan dan Regangan Hasil Uji Tensile Spesimen 4

Keterangan :

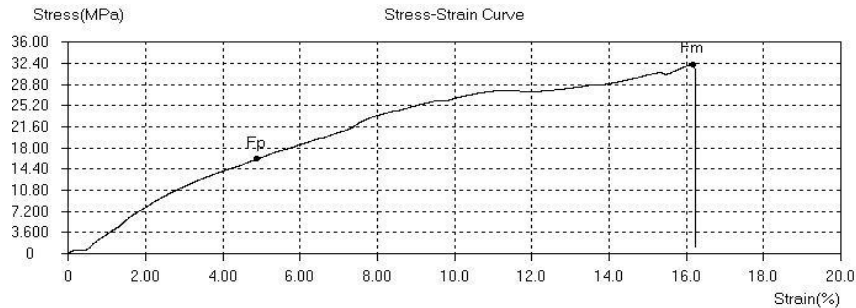
Tabel 4. 15 Tegangan dan Regangan Spesimen 3

Parameter	Nilai
Elastic limit	2.08 MPa
FeH	8.8 MPa
FeL	4.6 MPa
Fp	5.6 MPa
Fm (maksimum)	11.2 MPa
Strain Maksimum	4.70 %

Berdasarkan grafik tegangan-regangan, material menunjukkan batas elastis (elastic limit) pada kisaran 2,08 MPa dengan titik proporsional (F_p) sebesar 5,6 MPa, tegangan luluh atas (F_{eH}) mencapai 8,8 MPa, tegangan luluh bawah (F_{eL}) sebesar 4,6 MPa, serta tegangan maksimum (F_m) sebesar 11,2 MPa dengan regangan maksimum yang relatif rendah yaitu 4,70%; kondisi ini menunjukkan bahwa spesimen pada tabel di atas mengalami kegagalan yang bersifat getas (brittle) dengan karakteristik yield drop yang tajam, ditandai oleh daktilitas rendah sehingga material hanya memiliki kemampuan deformasi plastis yang sangat terbatas dan cenderung patah segera setelah melewati fase luluh tanpa peregangan signifikan, adanya perbedaan besar antara F_{eH} dan F_{eL} yang mengindikasikan fenomena pelepasan energi atau pergeseran dislokasi secara tiba-tiba saat material mulai luluh akibat struktur mikro yang kaku, serta kekuatan mekanik yang tergolong moderat ke rendah karena meskipun mampu mencapai tegangan maksimum 11,2 MPa, material tetap memiliki ketangguhan (toughness) rendah sehingga tidak mampu menyerap energi atau benturan dalam jumlah besar sebelum mengalami kegagalan.

5. Spesimen 5

Besaran tegangan dan regangan yang diterima oleh spesimen mengalami perubahan seiring dengan peningkatan beban tarik yang diberikan. Hubungan karakteristik antara tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) tersebut dapat diamati melalui grafik di bawah ini.



Gambar 4. 15 Grafik Tegangan dan Regangan Hasil Uji Tensile Spesimen 5

Keterangan :

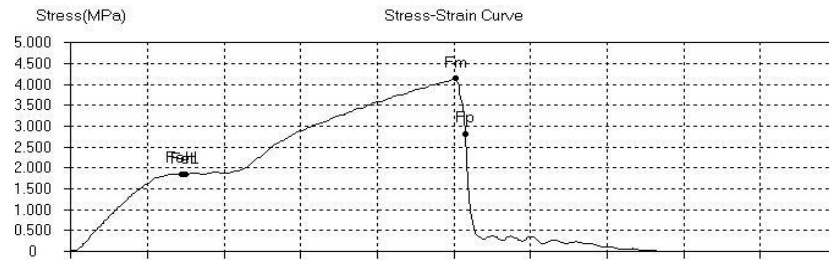
Tabel 4. 16 Tegangan dan Regangan Spesimen 5

Parameter	Nilai
Elastic limit	2.4 MPa
FeH	21.6 MPa
FeL	20.8 MPa
Fp	16.2 MPa
Fm (maksimum)	32.4 MPa
Strain Maksimum	16.20 %

Berdasarkan grafik tegangan-regangan, material menunjukkan batas elastis (elastic limit) pada kisaran 2,4 MPa dengan titik proporsional (Fp) sebesar 16,2 MPa, tegangan luluh atas (FeH) mencapai 21,6 MPa, tegangan luluh bawah (FeL) sebesar 20,8 MPa, serta tegangan maksimum (Fm) sebesar 32,4 MPa dengan regangan maksimum sebesar 16,20%; kondisi ini menunjukkan bahwa spesimen pada tabel T5 memiliki profil mekanik yang kuat dengan daktilitas menengah, ditandai oleh kekuatan tarik yang signifikan akibat struktur internal material yang rapat dan mampu menahan beban tarik tinggi, adanya efek strain hardening yang stabil karena perbedaan cukup besar antara tegangan luluh dan tegangan maksimum sehingga material mengalami penguatan regangan sebelum putus akibat interaksi dan penguncian dislokasi, serta sifat daktilitas moderat yang memungkinkan material mengalami deformasi permanen sebagai peringatan sebelum patah meskipun tidak sefleksibel material dengan regangan maksimum yang lebih tinggi.

6. Spesimen 6

Besaran tegangan dan regangan yang diterima oleh spesimen mengalami perubahan seiring dengan peningkatan beban tarik yang diberikan. Hubungan karakteristik antara tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) tersebut dapat diamati melalui grafik di bawah ini.



Gambar 4. 16 Grafik Tegangan dan Regangan Hasil Uji Tensile Spesimen 6

Keterangan :

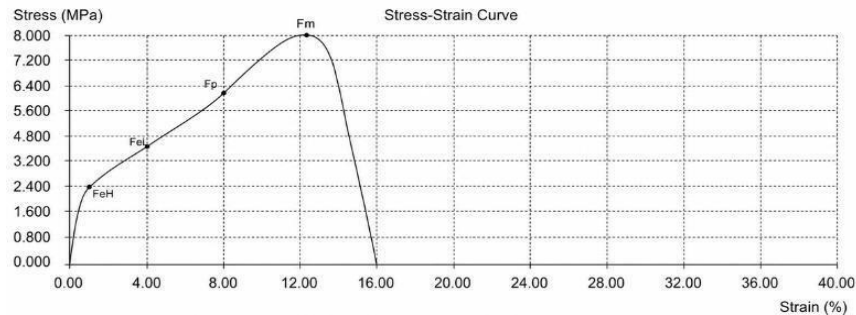
Tabel 4. 17 Tegangan dan Regangan Spesimen 6

Parameter	Nilai
Elastic limit	1,2 MPa
FeH	1,8 MPa
FeL	1,8 MPa
Fp	2,8 MPa
Fm (maksimum)	4,2 MPa
Strain Maksimum	3 %

Berdasarkan grafik tegangan-regangan, material menunjukkan batas elastis (elastic limit) pada kisaran 1,2 MPa dengan titik proporsional (F_p) sebesar 2,8 MPa, tegangan luluh atas (F_{eH}) dan tegangan luluh bawah (F_{eL}) yang identik sebesar 1,8 MPa, serta tegangan maksimum (F_m) sebesar 4,2 MPa dengan regangan maksimum yang sangat terbatas yaitu 3%; kondisi ini menunjukkan bahwa spesimen pada tabel T6 mengalami kegagalan getas (brittle failure) yang signifikan dengan kekuatan mekanik rendah, ditandai oleh daktilitas yang sangat rendah sehingga material hampir tidak memiliki kemampuan deformasi plastis dan cenderung patah secara mendadak setelah melewati titik luluh tanpa peregangan visual yang berarti, karakteristik luluh statis akibat nilai F_{eH} dan F_{eL} yang sama sehingga tidak terjadi fenomena yield drop dan transisi dari fase elastis ke plastis berlangsung langsung namun sangat singkat sebelum kegagalan terjadi, serta kekuatan struktural yang lemah karena tegangan maksimum yang rendah mengindikasikan material rapuh dengan ikatan antar partikel yang mudah terputus saat menerima beban tarik, sebagaimana umum ditemukan pada material seperti gips, keramik tertentu, atau komposit yang mengalami kegagalan pada fase matriksnya.

7. Spesimen 7

Tegangan dan regangan yang diterima oleh benda spesimen memiliki besaran yang berbeda disetiap pertambahan ukurannya. Data mengenai hubungan antara tegangan dan regangan dapat ditemukan pada gambar dibawah ini.



Gambar 4. 17 Grafik Tegangan dan Regangan Hasil Uji Tensile Spesimen 7

Keterangan :

Tabel 4. 18 Tegangan dan Regangan Spesimen 7

Parameter	Nilai
Elastic limit	2 MPa
FeH	2,7 MPa
FeL	3,2 MPa
Fp	6 MPa
Fm (maksimum)	8 MPa
Strain Maksimum	16 %

Berdasarkan data teknis tersebut, material menunjukkan batas elastis (elastic limit) pada kisaran 2 MPa dengan karakteristik luluh berupa tegangan luluh atas (FeH) sebesar 2,7 MPa dan tegangan luluh bawah (FeL) sebesar 3,2 MPa, serta titik proporsional (Fp) pada 6 MPa dan tegangan maksimum (Fm) mencapai 8 MPa pada regangan maksimum 16%. Perbedaan nilai FeH dan FeL ini menunjukkan kemungkinan adanya ketidakhomogenan pada struktur spesimen atau pengaruh laju pembebanan yang menyebabkan material mengalami strain hardening setelah melewati titik luluh. Nilai regangan maksimum sebesar 16% juga menunjukkan bahwa material memiliki daktilitas menengah, sehingga masih mampu mengalami deformasi permanen sebelum mengalami kegagalan.

4.3 Data Hasil Pengujian

A. Data Hasil Uji Bending

Pengujian kelenturan (bending test) dilakukan untuk menganalisis karakteristik mekanik spesimen ketika menerima beban tekan secara tegak lurus terhadap permukaan material. Seluruh spesimen diuji menggunakan dimensi standar yang sama, yaitu panjang 130 mm, lebar 13 mm, dan tebal 8 mm. Hasil pengujian yang meliputi nilai *Flexural Strength*, *Flexural Modulus*, *Stress*, dan *Strain* disajikan secara lengkap pada Tabel 4.19 berikut.

Tabel 4. 19 Data Hasil Uji Bending

Spesimen	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (GPa)	Stress (MPa)	Strain (%)
S1	130	13	8	543,28 MPa	14,11 GPa	68 MPa	79 %
S2	130	13	8	453,28 MPa	20,63 GPa	23.2 MPa	28.5 %
S3	130	13	8	303,25 MPa	33,01 GPa	8 MPa	9 %
S4	130	13	8	112,05 MPa	18,32 GPa	19.4 MPa	21 %
S5	130	13	8	187,05 MPa	35,73 GPa	12.8 MPa	12.6 %
S6	130	13	8	168,75 MPa	20,63 GPa	4.8 MPa	36.5 %
S7	130	13	8	221,84 MPa	47,12 GPa	12.8 MPa	15.20 %
Rata-rata (Σ)				284.21 MPa	27.07 GPa	21.2 MPa	28.8 %

Berdasarkan Tabel 4.19, hasil pengujian memperlihatkan adanya perbedaan nilai sifat mekanik yang cukup signifikan pada ketujuh spesimen yang diuji, yaitu S1 hingga S7. Secara umum, rata-rata nilai *Flexural Strength* seluruh spesimen diperoleh sebesar 284,21 MPa, sedangkan rata-rata *Flexural Modulus* mencapai 27,07 GPa. Selain itu, nilai rata-rata *Stress* dan *Strain* masing-masing tercatat sebesar 21,2 MPa dan 28,8%.

Analisis data *Flexural Strength* (kekuatan tekuk) menunjukkan bahwa spesimen S1 memiliki kemampuan menahan beban lentur paling tinggi dengan nilai mencapai 543,28 MPa. Sebaliknya, nilai *Flexural Strength* paling rendah diperoleh pada spesimen S4, yaitu sebesar 112,05 MPa. Menariknya, walaupun S1 memiliki kekuatan lentur tertinggi, nilai *Flexural Modulus* (kekakuan) terbesar justru dimiliki oleh spesimen S7 dengan nilai 47,12 GPa. Sementara itu, spesimen S1 mencatat nilai kekakuan paling rendah, yaitu 14,11 GPa. Kondisi tersebut sejalan dengan nilai *Strain* yang dimiliki S1, di mana spesimen ini menunjukkan tingkat elastisitas paling tinggi sebelum mengalami patah dengan nilai regangan mencapai 79%.

Pada parameter tegangan maksimum (*Stress*), spesimen S1 kembali menunjukkan nilai tertinggi, yaitu sebesar 68 MPa, kemudian diikuti oleh spesimen S2 dengan nilai 23,2 MPa. Sebaliknya, nilai *Stress* terendah diperoleh pada spesimen S6 yang hanya mencapai 4,8 MPa. Untuk parameter regangan (*Strain*), setelah spesimen S1 yang memiliki nilai tertinggi sebesar 79%, tingkat elastisitas berikutnya secara berurutan dimiliki oleh spesimen S6 sebesar 36,5% dan S2 sebesar 28,5%. Sementara itu, sifat paling getas atau paling kaku ditunjukkan oleh spesimen S3 yang hanya mampu mengalami regangan sebesar 9% dengan kapasitas *Stress* sebesar 8 MPa.

Perbedaan nilai parameter mekanik yang cukup fluktuatif pada setiap spesimen

menunjukkan adanya pengaruh faktor internal material selama proses manufaktur atau fabrikasi berlangsung, seperti tingkat homogenitas distribusi bahan penguat, kualitas ikatan antarmuka antara matriks dan serat, serta kemungkinan terbentuknya cacat mikro atau void pada material.

B. Data Hasil Uji Tensile

Pengujian tarik (*tensile test*) dilakukan untuk mengetahui kemampuan mekanis spesimen dalam menahan gaya tarik aksial yang bekerja searah pada material. Seluruh spesimen diuji menggunakan dimensi geometri yang sama, yaitu panjang 250 mm, lebar 25 mm, dan ketebalan 4 mm. Parameter hasil pengujian meliputi *Tensile Strength*, *Tensile Modulus*, *Stress*, dan *Strain*, yang disajikan secara rinci pada Tabel 4.20 berikut.

Tabel 4. 20 Data Hasil Uji Tensile

Spesimen	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Tensile Strength (MPa)	Tensile Modulus (GPa)	Stress (MPa)	Strain (%)
T1	250	25	4	7.048 MPa	0.680 GPa	7.6 MPa	3.30 %
T2	250	25	4	16.36 MPa	0.908 GPa	16.2 MPa	5.30 %
T3	250	25	4	2.050 MPa	0.416 GPa	2.5 MPa	1.80 %
T4	250	25	4	11.36 MPa	0.792 GPa	11.2 MPa	4.70 %
T5	250	25	4	32.36 MPa	0.597 GPa	32.4 MPa	16.20 %
T6	250	25	4	4.014 MPa	0.614 GPa	4.2 MPa	3 %
T7	250	25	4	8.092 MPa	0.477 GPa	8 MPa	16%
Rata-rata (Σ)				11.61 MPa	0.640 GPa	11.7 MPa	7.1 %

Berdasarkan Tabel 4.20, hasil pengujian mekanik pada ketujuh spesimen, yaitu T1 hingga T7, menunjukkan variasi karakteristik nilai yang cukup signifikan. Secara umum, rata-rata nilai kekuatan tarik (*Tensile Strength*) diperoleh sebesar 11,61 MPa, sedangkan rata-rata modulus elastisitas tarik (*Tensile Modulus*) mencapai 0,640 GPa. Selain itu, nilai rata-rata tegangan (*Stress*) tercatat sebesar 11,7 MPa, dengan rata-rata regangan maksimum (*Strain*) yang dialami material sebelum putus sebesar 7,1%.

Berdasarkan analisis data *Tensile Strength*, spesimen T5 menunjukkan performa paling baik dengan nilai kekuatan tarik tertinggi sebesar 32,36 MPa. Sebaliknya, nilai kekuatan tarik terendah diperoleh pada spesimen T3 yang hanya mampu menahan beban tarik hingga 2,050 MPa. Pola tersebut sejalan dengan parameter *Stress*, di mana nilai tegangan maksimum juga dicapai oleh spesimen T5 sebesar 32,4 MPa, sementara nilai terendah terdapat pada spesimen T3 sebesar 2,5 MPa.

Hasil analisis data *Tensile Strength* menunjukkan bahwa spesimen T5 memiliki performa paling unggul dengan nilai kekuatan tarik tertinggi sebesar 32,36 MPa. Di sisi lain, spesimen T3 menunjukkan nilai kekuatan tarik terendah karena hanya mampu menahan beban tarik sebesar 2,050 MPa. Kondisi tersebut sejalan dengan parameter *Stress*, di mana spesimen T5 juga mencatat nilai tegangan maksimum tertinggi sebesar 32,4 MPa, sedangkan nilai paling rendah diperoleh spesimen T3 sebesar 2,5 MPa.

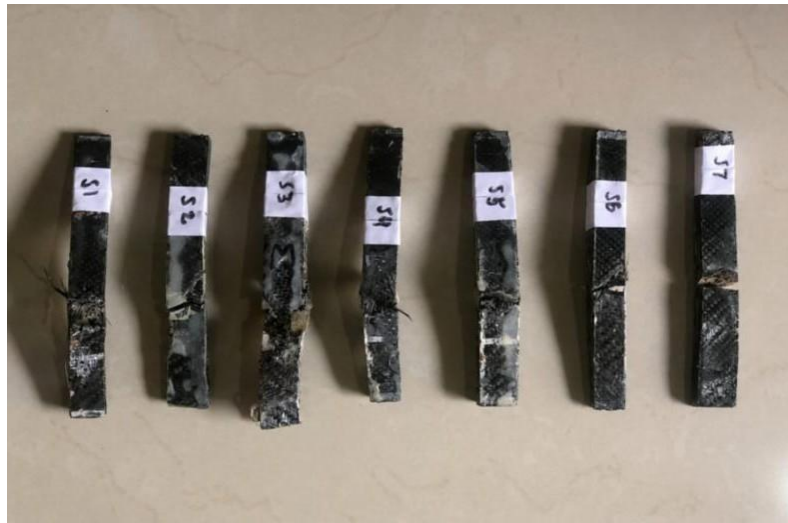
Meskipun spesimen T5 memiliki nilai kekuatan tarik tertinggi, tingkat kekakuan

materialnya masih berada pada kategori sedang. Nilai kekakuan tertinggi atau *Tensile Modulus* justru dimiliki oleh spesimen T2 dengan nilai sebesar 0,908 GPa, kemudian diikuti oleh spesimen T4 sebesar 0,792 GPa. Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur spesimen T2 memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menahan deformasi elastis saat menerima beban awal. Sementara itu, nilai modulus terendah diperoleh pada spesimen T3 dengan nilai sebesar 0,416 GPa.

Pada parameter regangan (*Strain*), spesimen T5 memperoleh nilai tertinggi sebesar 16,20%, yang kemudian diikuti sangat dekat oleh spesimen T7 dengan nilai 16%. Nilai regangan yang tinggi tersebut menunjukkan bahwa kedua spesimen memiliki sifat lebih duktail atau elastis ketika menerima beban tarik dibandingkan spesimen lainnya. Sebaliknya, spesimen T3 memperlihatkan sifat paling getas (*brittle*) dengan nilai regangan terendah, yaitu hanya sebesar 1,80% sebelum mengalami patah total. Secara umum, fluktuasi nilai mekanis pada spesimen T1 hingga T7 dipengaruhi oleh beberapa faktor internal, seperti tingkat homogenitas distribusi serat di dalam matriks serta adanya cacat manufaktur berupa rongga udara (*void*).

4.3.1 Analisa Visual Kerusakan Material Komposit Uji Bending

Pada subbab ini dibahas hasil pengujian *bending* pada spesimen komposit berbahan carbon fiber dan serabut kelapa yang dilakukan pada setiap spesimen uji. Pengujian dilaksanakan menggunakan alat *Universal Testing Machine* dengan metode *bending* di Workshop Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan, Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro.



Gambar 4. 18 Spesimen Hasil Pengujian Three Point Bending

Secara visual, ketujuh spesimen uji (S.1, S.2, S.3, S.4, S.5, S.6, S.7) menunjukkan pola kegagalan kompleks antara lain:

- Delaminasi (Delamination), Kerusakan delaminasi terlihat pada beberapa spesimen seperti S3, S4, dan S5, yang ditandai dengan terjadinya pemisahan antar lapisan komposit. Indikasi kerusakan ini tampak dari terbukanya lapisan material serta munculnya celah di antara susunan serat dan matriks. Delaminasi umumnya terjadi akibat lemahnya ikatan antar layer yang dipengaruhi oleh tegangan geser selama proses pengujian lentur berlangsung.

- Fiber Pull-Out, Pada beberapa spesimen terlihat adanya serat yang tercabut atau terlepas dari matriks resin, khususnya pada bagian tengah area patahan. Fenomena ini dikenal sebagai fiber pull-out. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa ikatan antara serat carbon fiber dan resin belum terbentuk secara optimal, sehingga ketika menerima beban, serat cenderung tercabut terlebih dahulu sebelum mengalami patah secara sempurna.
- Fracture Surface (Permukaan Patahan), Seluruh spesimen yang mengalami kegagalan menunjukkan adanya fracture surface atau permukaan patahan. Permukaan patahan tersebut terlihat kasar dan tidak merata, yang merupakan ciri khas kerusakan pada material komposit. Pada spesimen S5 dan S7, permukaan patahan tampak lebih jelas karena terjadi kerusakan yang cukup signifikan pada bagian tengah spesimen.
- Matrix Cracking, Retakan pada matriks resin juga tampak pada beberapa spesimen sebelum terjadi patah secara menyeluruh. Munculnya retakan kecil pada permukaan menjadi indikasi awal terjadinya kegagalan material akibat pengaruh tegangan tarik dan tekan selama proses pengujian lentur berlangsung.
- Interfacial Failure, Pada beberapa bagian spesimen terlihat indikasi terjadinya kegagalan antarmuka antara serat dan matriks (fiber–matrix debonding). Kondisi ini terjadi akibat melemahnya adhesi antara resin dan carbon fiber, sehingga proses transfer beban dari matriks ke serat tidak dapat berlangsung secara optimal.

Berdasarkan hasil pengamatan visual pada spesimen komposit serat carbon fiber setelah dilakukan pengujian mekanik, seluruh spesimen menunjukkan kerusakan dengan tingkat serta pola kegagalan yang bervariasi. Kerusakan tersebut memperlihatkan karakteristik khas material komposit akibat pembebanan lentur, di mana tegangan tarik, tekan, dan geser bekerja secara bersamaan pada struktur material. Secara umum, jenis kerusakan yang teramati meliputi *matrix cracking*, delaminasi (*delamination*), *fiber pull-out*, serta *fracture surface*.

- a. Pada spesimen S1 terlihat adanya retakan yang muncul pada bagian tengah hingga bawah spesimen, disertai deformasi lokal dalam skala kecil. Retakan tersebut mengindikasikan terjadinya *matrix cracking* akibat pengaruh tegangan tarik pada sisi bawah spesimen selama proses pembebanan lentur. Selain itu, tampak beberapa serat mulai terlepas dari matriks resin yang menandakan awal terjadinya fenomena *fiber pull-out*.
- b. Spesimen S2 memperlihatkan kerusakan berupa retakan memanjang yang disertai patahan lokal pada bagian tengah spesimen. Permukaan patahan terlihat kasar dan tidak merata, yang merupakan karakteristik fracture surface pada material komposit. Kerusakan tersebut menunjukkan bahwa retakan pada matriks telah berkembang lebih lanjut hingga menyebabkan kegagalan pada sebagian struktur komposit.
- c. Pada spesimen S3, kerusakan yang terjadi terlihat lebih kompleks dibandingkan spesimen lainnya. Bagian tengah spesimen mengalami kerusakan yang cukup signifikan disertai pemisahan antar lapisan material komposit. Kondisi tersebut mengindikasikan terjadinya delaminasi akibat rendahnya kekuatan ikatan antar layer ketika menerima tegangan geser. Selain itu, tampak serat carbon fiber tercabut dari matriks resin yang menunjukkan adanya fenomena fiber pull-out.
- d. Pada spesimen S3 terlihat kerusakan yang lebih kompleks dibandingkan spesimen lainnya. Kerusakan pada area tengah spesimen tampak cukup besar dan disertai terpisahnya antar lapisan material komposit. Kondisi tersebut menandakan terjadinya delaminasi yang disebabkan oleh lemahnya ikatan antar layer ketika menerima tegangan

- geser. Selain itu, terlihat pula serat carbon fiber yang terlepas dari matriks resin, sehingga mengindikasikan terjadinya fiber pull-out.
- e. Spesimen S3 menunjukkan pola kerusakan yang lebih kompleks dibandingkan spesimen lainnya. Pada bagian tengah spesimen terlihat kerusakan yang cukup parah disertai pemisahan antar lapisan komposit. Fenomena tersebut mengindikasikan terjadinya delaminasi akibat rendahnya kekuatan ikatan antar layer saat menerima tegangan geser. Selain itu, tampak pula serat carbon fiber yang tercabut dari matriks resin, yang menandakan adanya kegagalan berupa fiber pull-out.
 - f. Spesimen S4 mengalami kerusakan berupa retakan memanjang yang disertai kerusakan lokal pada bagian tengah spesimen. Permukaan patahan tampak kasar dan tidak seragam, yang menunjukkan karakteristik fracture surface pada material komposit. Retakan yang menyebar pada area matriks resin mengindikasikan bahwa kerusakan diawali oleh matrix cracking sebelum berkembang menjadi patahan yang lebih besar.
 - g. Pada spesimen S5 terlihat adanya retakan serta kerusakan lokal pada bagian tengah hingga bawah spesimen. Kerusakan tersebut menunjukkan kombinasi antara matrix cracking dan interfacial failure, yaitu terlepasnya ikatan antara serat dan matriks. Meskipun belum mengalami patah total, struktur komposit telah mengalami penurunan kekuatan akibat adanya kerusakan internal pada material.
 - h. Spesimen S6 menunjukkan tingkat kerusakan yang relatif lebih ringan dibandingkan spesimen lainnya. Meskipun demikian, masih terlihat retakan kecil pada bagian tengah spesimen yang menandakan terjadinya retak awal pada matriks resin. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa spesimen masih memiliki kemampuan menahan beban yang lebih baik dibandingkan beberapa spesimen lainnya.
 - i. Pada spesimen S7 terlihat adanya patahan lokal pada bagian bawah spesimen yang disertai retakan melintang. Permukaan patahan tampak kasar dan menunjukkan karakteristik fracture surface. Selain itu, terdapat indikasi delaminasi dalam skala kecil pada area patahan yang menandakan terjadinya pemisahan antar lapisan komposit akibat pengaruh pembebanan lentur.

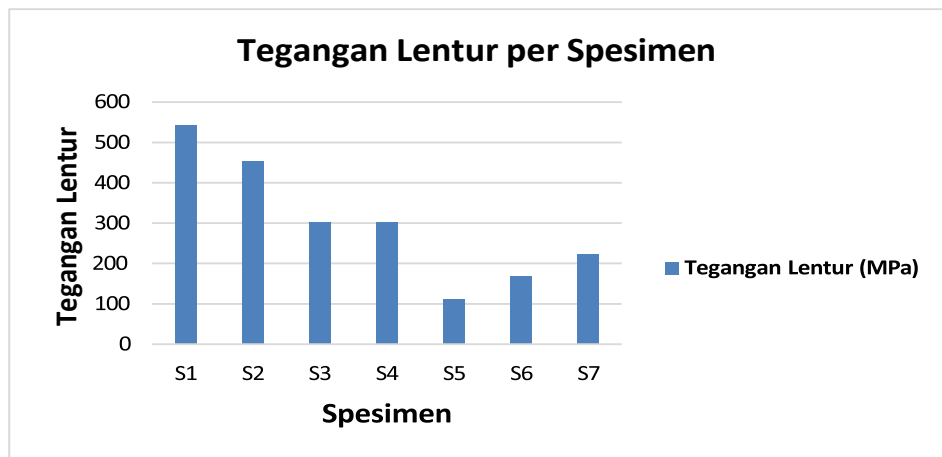
Secara keseluruhan, ketujuh spesimen memperlihatkan mekanisme kegagalan yang cukup kompleks, yang merupakan kombinasi dari *matrix cracking*, delaminasi, *fiber pull-out*, *fracture surface*, serta *interfacial failure*. Perbedaan tingkat kerusakan pada setiap spesimen dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti distribusi resin, kualitas impregnasi serat, orientasi serat carbon fiber, keberadaan *void*, serta kekuatan adhesi antara serat dan matriks selama proses fabrikasi komposit berlangsung.

4.3.2 Grafik Hasil Pengujian Bending

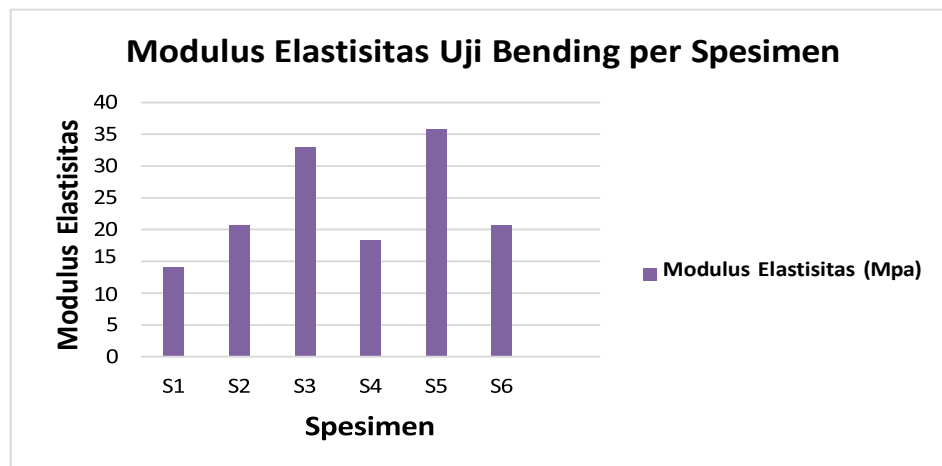
Penjelasan grafik dilakukan untuk menampilkan kecenderungan data hasil pengujian bending serta mendeskripsikan temuan yang diperoleh dari grafik tersebut sehingga pembaca lebih mudah memahami informasi visual yang disajikan. Grafik dibuat berdasarkan data pada tabel dengan memperlihatkan perbandingan nilai tegangan lentur dan modulus elastisitas pada setiap spesimen. Adapun penyajian grafik hasil pengujian bending ditunjukkan sebagai berikut:

Tabel 4. 21 Hasil Pengujian Bending

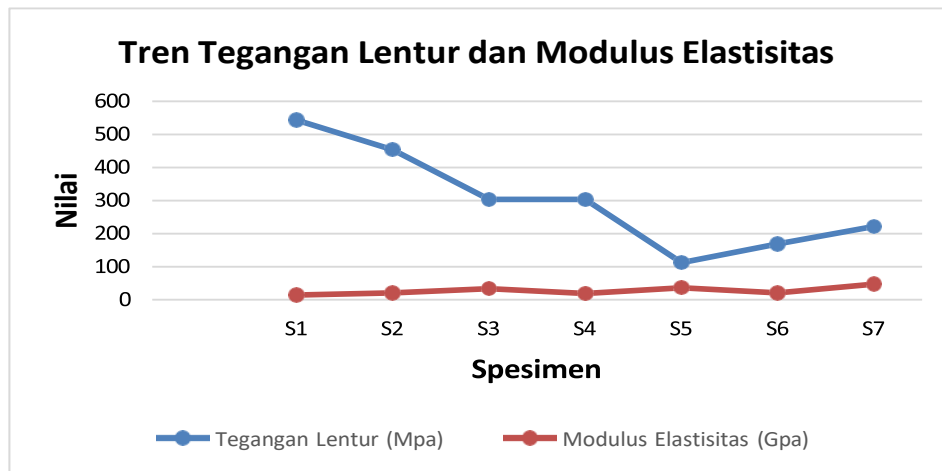
Spesimen	Tegangan Lentur (Mpa)	Modulus Elastisitas (Gpa)
S1	543.28	14.11
S2	453.28	20.63
S3	303.25	33.01
S4	303.25	18.32
S5	112.05	35.73
S6	168.75	20.63
S7	221.84	47.12



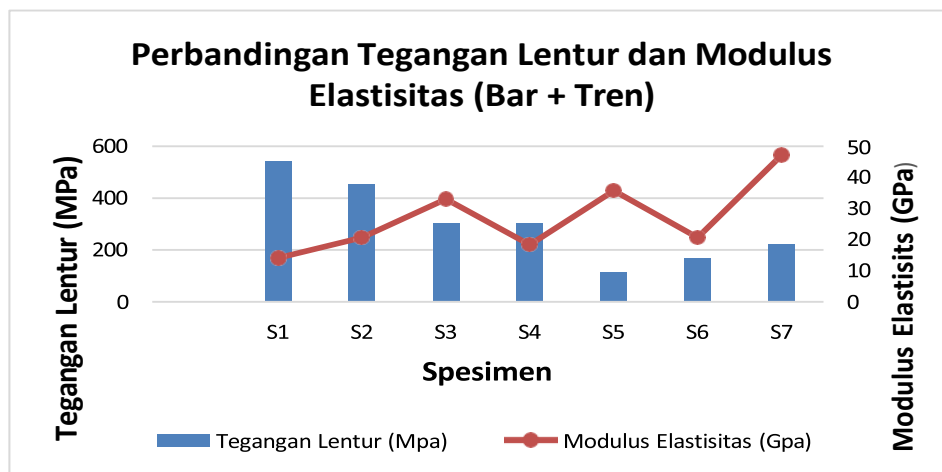
Gambar 4. 19 Grafik Tegangan Lentur per Spesimen



Gambar 4. 20 Grafik Modulus Elastisitas Uji Bending per Spesimen



Gambar 4. 21 Grafik Tren Tegangan Lentur dan Modulus Elastisitas



Gambar 4. 22 Grafik Perbandingan Tegangan Lentur dan Modulus Elastisitas (Bar + Tren)

Grafik tegangan lentur menunjukkan kemampuan material dalam menahan beban *bending* sebelum mengalami kegagalan struktur, yang dinyatakan dalam satuan MPa. Nilai tertinggi diperoleh pada spesimen S1 dengan besar 543,28 MPa. Berdasarkan grafik batang, terlihat adanya penurunan tegangan lentur yang cukup signifikan dari spesimen S1 ke S2, kemudian nilai cenderung stabil pada spesimen S3 dan S4 di kisaran 303,25 MPa. Setelah itu, nilai mengalami penurunan hingga mencapai titik terendah pada spesimen S5 sebesar 112,05 MPa, sebelum kembali meningkat pada spesimen S6 dan S7. Variasi nilai tersebut menunjukkan adanya pengaruh yang cukup besar dari kondisi maupun komposisi manufaktur terhadap kekuatan mekanis material. Pada spesimen S1, rasio antara serat dan matriks diduga berada pada kondisi yang paling optimal (*optimum fiber to matrix ratio*) serta didukung oleh ikatan antarmuka (*interfacial bonding*) yang kuat, sehingga distribusi beban tarik dan tekan dapat berlangsung lebih efektif.

Grafik modulus elastisitas pada pengujian *bending* menunjukkan tingkat kekakuan spesimen dalam menahan deformasi elastis. Data hasil pengujian memperlihatkan tren yang fluktuatif pada spesimen S1 hingga S6, dengan nilai tertinggi diperoleh pada spesimen S5 sebesar 35,73 GPa (tertulis MPa pada legenda grafik). Fluktuasi nilai kekakuan tersebut diduga

dipengaruhi oleh ketidakseragaman ikatan antar lapisan serat pada material komposit. Pada grafik berwarna ungu, terlihat bahwa spesimen S3 dan S5 memiliki nilai modulus yang jauh lebih tinggi dibandingkan spesimen lainnya. Kondisi ini mengindikasikan bahwa distribusi serat penguat pada S3 dan S5 tersusun lebih rapat dan homogen, sehingga mampu mengurangi potensi terbentuknya *void* maupun delaminasi mikro serta meningkatkan kekakuan struktur secara signifikan.

Pada grafik tren tegangan lentur dan modulus elastisitas terlihat adanya perbedaan skala yang cukup besar antara garis biru (MPa) dan garis merah (GPa). Garis merah tampak berada jauh di bawah serta cenderung stabil pada kisaran nilai 14 hingga 47. Dari visualisasi tersebut terlihat hubungan yang menarik, di mana penurunan signifikan pada garis biru tidak selalu diikuti oleh penurunan pada garis merah. Sebagai contoh, pada spesimen S5 terjadi penurunan drastis nilai tegangan lentur, namun nilai modulus elastisitas justru mengalami peningkatan. Fenomena ini menunjukkan bahwa material dengan kekuatan lentur yang rendah tidak selalu mengalami penurunan kekakuan, sekaligus memperkuat validitas hasil data pengujian yang diperoleh.

Grafik kombinasi tersebut menunjukkan bahwa grafik batang berwarna biru digunakan untuk menggambarkan batas maksimum tegangan lentur yang dapat ditahan material sebelum mengalami patah total, sedangkan grafik garis merah merepresentasikan modulus elastisitas atau tingkat kekakuan material dalam menahan deformasi awal. Kedua grafik memperlihatkan tren yang cenderung berlawanan pada spesimen S1 hingga S7, yang dipengaruhi oleh karakteristik mikrostruktur hasil proses fabrikasi. Hal ini terlihat pada spesimen S1 yang memiliki nilai kekuatan lentur tertinggi sebesar 543,28 MPa, namun cenderung lebih fleksibel karena distribusi beban pada permukaan luar berlangsung lebih merata. Sebaliknya, spesimen S5 dan S7 menunjukkan penurunan kekuatan lentur, dengan nilai terendah terjadi pada S5 sebesar 112,05 MPa, tetapi justru memiliki nilai kekakuan yang tinggi, yaitu 47,12 GPa pada S7 dan 35,73 GPa pada S5. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa susunan serat penguat di dalam material terdistribusi lebih rapat, padat, dan homogen, sehingga struktur menjadi lebih mampu menahan deformasi awal, namun cenderung bersifat lebih getas (*brittle*) ketika beban lentur terus meningkat.

Secara keseluruhan, tren data memperlihatkan bahwa spesimen S1 menunjukkan performa terbaik dalam aspek kekuatan tekuk (*flexural strength*) untuk menahan beban lentur maksimum, sedangkan spesimen S5 dan S7 lebih menonjol pada parameter kekakuan atau modulus elastisitas. Penurunan nilai tegangan lentur yang disertai kenaikan modulus elastisitas pada beberapa spesimen mengindikasikan adanya pengaruh perubahan mikrostruktur akibat perbedaan kondisi selama proses manufaktur. Oleh sebab itu, dapat disimpulkan bahwa nilai kekuatan lentur yang tinggi tidak selalu berbanding lurus dengan tingkat kekakuan material. Susunan serat penguat internal yang lebih padat dan homogen mampu meningkatkan kekakuan struktur dalam menghadapi deformasi awal, namun juga berpotensi membuat material menjadi lebih getas (*brittle*) ketika menerima beban lentur yang terus meningkat.

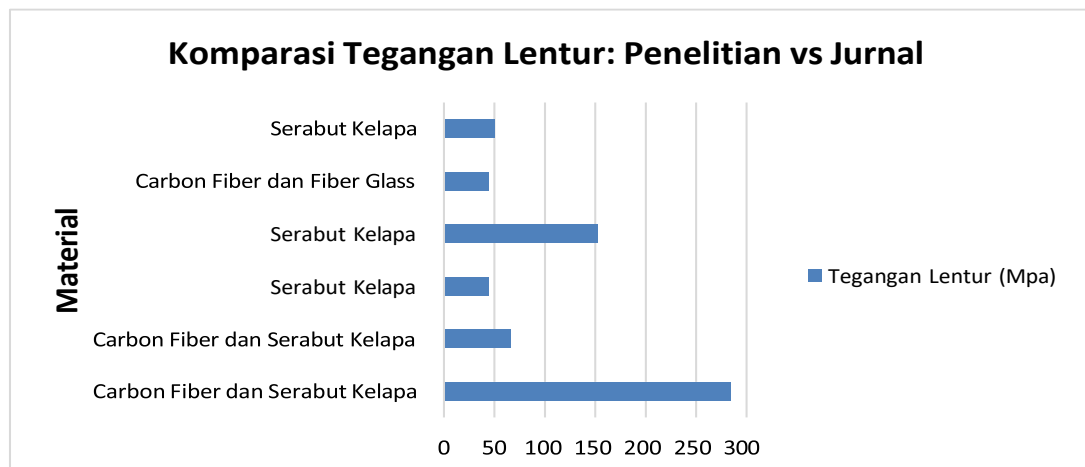
4.3.3 Komparasi Tegangan Lentur Material Komposit Lambung Kapal

Kekuatan lentur (*flexural strength*) merupakan salah satu parameter penting dalam pemilihan material lambung perahu nelayan, karena selama proses operasional lambung perahu akan menerima beban benturan serta beban tekuk dinamis (*dynamic loading*). Pada penelitian

ini, penggunaan material hibrid antara serat karbon (*carbon fiber*) dan serabut kelapa bertujuan untuk mengkaji sejauh mana kombinasi kedua jenis serat tersebut mampu meningkatkan sifat mekanis lambung perahu terhadap beban mekanis di perairan, sekaligus menjadi alternatif material yang lebih ekonomis. Selanjutnya, nilai kekuatan dan kelenturan material komposit hibrid serat karbon dan serabut kelapa yang diperoleh dari hasil pengujian mekanis dibandingkan dengan material komposit yang umum digunakan pada lambung perahu tradisional saat ini. Perbandingan tersebut dilakukan untuk menganalisis efektivitas hasil eksperimen yang telah dilaksanakan. Berikut merupakan data komparasi yang diperoleh:

Tabel 4. 22 Data Komparasi Material Komposit

Sumber Data	Material	Matriks	Tegangan Lentur (MPa)
Hasil Penelitian Saat Ini (2026)	Carbon Fiber + Serabut Kelapa	Epoxy	284.21
(Singh et al., 2020b)	Carbon Fiber + Serabut Kelapa	Epoxy	65.5
(M et al., 2022)	Serabut Kelapa	Termoseting Polyester	44.27
(Puttaswamygowda et al., 2024)	Serabut Kelapa	Epoxy	152.6
(K. Kumar et al., 2024)	Carbon Fiber + Fiber Glass	Epoxy	44.31`
(Pratika et al., 2025)	Serabut Kelapa	Polyester	50.3



Gambar 4. 23 Grafik Komparasi Kekuatan Impak Material Komposit

Tabel dan grafik tersebut menyajikan perbandingan performa tegangan lentur dari spesimen komposit Carbon Fiber + Serabut Kelapa dengan matriks Epoxy hasil penelitian ini terhadap beberapa variasi material komposit sejenis dari penelitian terdahulu yang relevan. Berdasarkan data komparasi, spesimen hasil penelitian tahun 2026 menunjukkan keunggulan kekuatan yang sangat signifikan dengan nilai tegangan lentur mencapai 284,21 MPa. Nilai tersebut jauh lebih tinggi dibandingkan hasil penelitian Singh et al. (2020b) yang menggunakan material serupa, yaitu Carbon Fiber + Serabut Kelapa + Epoxy, namun hanya memperoleh kekuatan sebesar 65,5 MPa. Perbedaan ini diduga dipengaruhi oleh optimalisasi metode

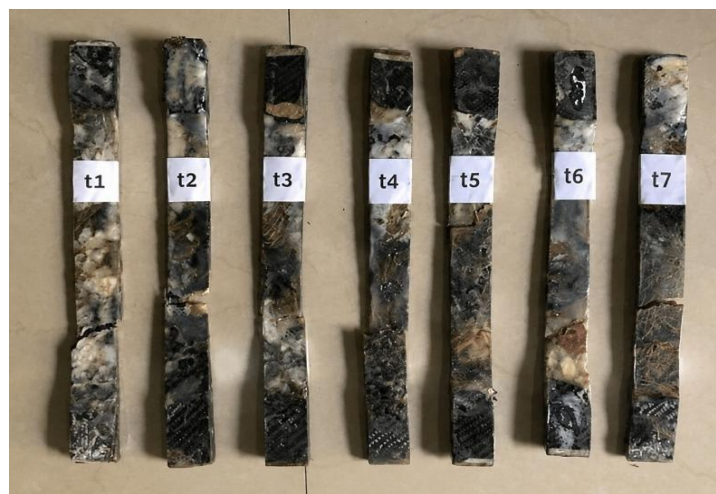
manufaktur, pengaturan fraksi volume serat, serta penggunaan matriks epoxy berkualitas tinggi yang mampu meningkatkan kekuatan mekanis sekaligus menghasilkan ikatan antarmuka (*interfacial bonding*) yang lebih kuat dan homogen.

Di sisi lain, variasi komposit berbasis serat alam murni seperti penelitian (Puttaswamygowda et al.) dengan penggunaan matriks epoxy juga menunjukkan nilai kekuatan yang cukup baik, yaitu sebesar 152,6 MPa. Nilai tersebut dipengaruhi oleh densitas material serta perlakuan khusus yang diberikan pada serabut kelapa yang digunakan. Namun demikian, nilai kekuatan cenderung mengalami penurunan signifikan pada penggunaan matriks polyester atau termoset polyester, sebagaimana ditunjukkan pada penelitian (M et al. dan Pratika et al.), yang hanya berada pada kisaran 44,27 MPa hingga 50,3 MPa. Oleh sebab itu, komposit hibrid Carbon Fiber dan serabut kelapa dengan matriks epoxy pada penelitian ini menunjukkan potensi yang sangat besar sebagai material alternatif untuk aplikasi lambung perahu nelayan, karena nilai kekuatan yang tinggi dinilai mampu memenuhi kebutuhan ketahanan mekanis pada konstruksi perkapalan.

Perlu diperhatikan bahwa perbandingan nilai tegangan lentur pada tabel dan grafik tersebut bersifat indikatif dan tidak dapat disamakan sepenuhnya, karena terdapat perbedaan pada standar pengujian, jumlah lapisan serat, metode fabrikasi, serta dimensi spesimen yang digunakan oleh masing-masing peneliti. Oleh karena itu, komparasi ini dilakukan untuk memberikan gambaran mengenai posisi relatif material komposit yang dikembangkan dibandingkan dengan material pembanding dari berbagai jurnal ilmiah terdahulu, bukan untuk menyatakan bahwa seluruh kondisi pengujian memiliki kesetaraan secara mutlak.

4.3.4 Analisa Visual Kerusakan Material Komposit Uji Tensile

Pada subbab ini dibahas hasil pengujian *bending* pada spesimen komposit berbahan carbon fiber dan serabut kelapa yang dilakukan pada masing-masing spesimen uji. Pengujian dilaksanakan menggunakan alat *Universal Testing Machine* dengan metode *bending* di Workshop Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan, Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro.



Gambar 4. 24 Spesimen Hasil Pengujian Tensile

Secara visual, ketujuh spesimen uji (T.1, T.2, T.3, T.4, T.5, T.6, T.7) menunjukkan pola

kegagalan kompleks antara lain:

- Delaminasi (Delamination) Kerusakan delaminasi terlihat pada beberapa spesimen seperti T3, T5, dan T7, yang ditandai dengan terjadinya pemisahan antar lapisan komposit. Ciri kerusakan ini tampak dari terbukanya lapisan material serta munculnya celah atau retakan di antara susunan serat dan matriks resin. Delaminasi umumnya terjadi akibat adanya tegangan geser antar lapisan selama proses pengujian lentur berlangsung.
- *Fiber Pull-Out*, Indikasi *fiber pull-out* terlihat pada area patahan beberapa spesimen, khususnya pada T3 dan T5. Serat carbon fiber tampak tercabut atau terlepas dari matriks resin. Kondisi ini menunjukkan bahwa ikatan adhesi antara serat dan resin belum terbentuk secara optimal, sehingga serat cenderung terlepas sebelum mengalami patah secara sempurna.
- Fracture Surface Seluruh spesimen menunjukkan adanya *fracture surface* atau permukaan patahan. Permukaan patahan tampak kasar, tidak rata, dan tidak homogen, yang merupakan karakteristik umum kegagalan pada material komposit. Pada spesimen T5 dan T7, *fracture surface* terlihat lebih jelas karena terjadi retakan besar serta patahan lokal pada bagian tengah hingga bawah spesimen.
- Matrix Cracking Retakan pada matriks resin juga terlihat pada hampir seluruh spesimen, terutama pada bagian tengah yang menerima tegangan lentur paling besar. Kerusakan ini dikenal sebagai *matrix cracking*, yaitu retakan awal pada matriks resin sebelum berkembang menjadi delaminasi maupun patah total pada material.
- Interfacial Failure (Debonding) Pada beberapa bagian terlihat adanya indikasi kegagalan ikatan antara serat dan matriks (*fiber-matrix debonding*). Kondisi ini ditandai dengan adanya area yang tampak kosong atau tidak terikat sempurna antara serat carbon fiber dan resin.
- Pada beberapa bagian terlihat adanya indikasi kegagalan ikatan antara serat dan matriks (*fiber-matrix debonding*). Kondisi ini ditandai dengan adanya area yang tampak kosong atau tidak terikat sempurna antara serat carbon fiber dan resin.

Berdasarkan hasil pengamatan visual pada spesimen komposit serat carbon fiber setelah dilakukan pengujian mekanik, seluruh spesimen menunjukkan adanya kerusakan dengan karakteristik yang bervariasi. Kerusakan tersebut mencerminkan mekanisme kegagalan khas material komposit akibat pembebanan lentur, di mana tegangan tarik, tekan, dan geser bekerja secara simultan pada struktur material. Secara umum, jenis kerusakan yang teramati meliputi retak matriks (*matrix cracking*), delaminasi, *fiber pull-out*, serta permukaan patahan (*fracture surface*).

- a. Pada spesimen T1 terlihat adanya retakan pada bagian bawah spesimen yang menandakan awal terjadinya kegagalan akibat tegangan tarik. Area kerusakan tampak tidak merata dan disertai perubahan warna pada matriks resin, yang mengindikasikan terjadinya *matrix cracking*. Selain itu, juga terlihat indikasi awal delaminasi pada bagian tengah spesimen akibat terjadinya pemisahan antar lapisan komposit.
- b. Spesimen T2 memperlihatkan kerusakan berupa retakan memanjang yang disertai kerusakan lokal pada bagian tengah hingga bawah spesimen. Permukaan patahan tampak kasar dan tidak seragam, yang menjadi ciri khas *fracture surface* pada material komposit. Selain itu, pada beberapa bagian terlihat serat mulai terlepas dari matriks resin, yang

- mengindikasikan terjadinya *fiber pull-out*.
- c. Pada spesimen T3, kerusakan yang terjadi terlihat lebih kompleks dibandingkan spesimen sebelumnya. Terlihat adanya retakan besar pada bagian tengah spesimen yang disertai pemisahan antar lapisan material komposit. Kondisi tersebut menunjukkan terjadinya delaminasi akibat rendahnya kekuatan geser antar layer. Selain itu, tampak serat carbon fiber yang terlepas dari matriks resin, yang mengindikasikan terjadinya kegagalan ikatan antara serat dan matriks (*fiber–matrix debonding*).
 - d. Spesimen T4 mengalami kerusakan berupa retakan memanjang yang disertai deformasi lokal pada area pembebanan. Permukaan patahan menunjukkan tekstur yang tidak merata, yang mengindikasikan terjadinya *fracture surface*. Retakan yang menyebar pada matriks resin menunjukkan bahwa kerusakan berawal dari *matrix cracking* sebelum berkembang menjadi kegagalan yang lebih luas.
 - e. Pada spesimen T5 terlihat kerusakan yang paling dominan ditandai dengan adanya retakan besar serta patahan lokal pada bagian tengah spesimen. Kerusakan tersebut menunjukkan kombinasi beberapa mekanisme kegagalan, yaitu delaminasi, *fiber pull-out*, dan *fracture surface* yang terjadi secara bersamaan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa spesimen mengalami konsentrasi tegangan lentur yang tinggi sehingga memicu kegagalan struktur secara bertahap.
 - f. Spesimen T6 memperlihatkan tingkat kerusakan yang relatif lebih ringan dibandingkan spesimen lainnya. Meskipun demikian, masih tampak adanya retakan kecil pada bagian tengah serta indikasi terjadinya pelepasan ikatan antara serat dan matriks. Kondisi ini menunjukkan adanya *interfacial failure* atau *debonding*, meskipun spesimen belum mengalami patah total yang signifikan.
 - g. Pada spesimen T7 terlihat adanya retakan serta patahan pada bagian bawah spesimen, dengan permukaan patahan yang kasar dan tidak seragam. Kondisi tersebut menunjukkan terjadinya *fracture surface* akibat tegangan tarik maksimum pada sisi bawah selama pengujian lentur. Selain itu, juga terlihat adanya pemisahan antar lapisan komposit yang mengindikasikan terjadinya delaminasi lokal.

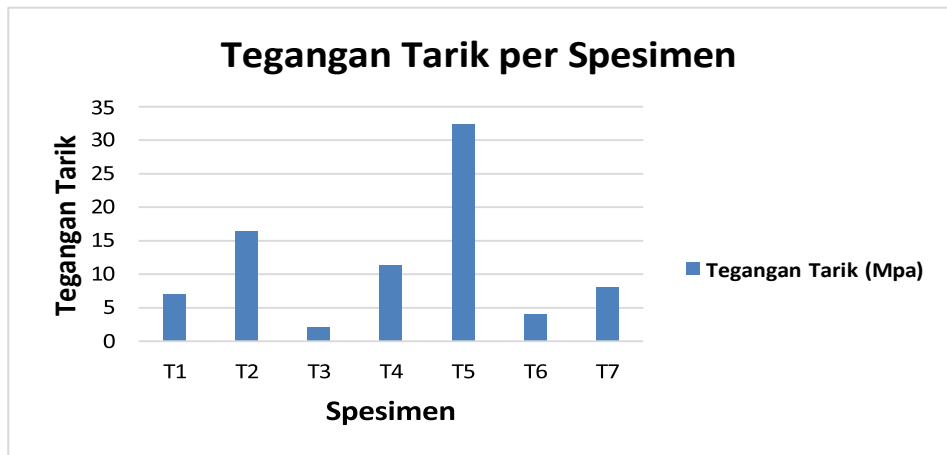
Secara umum, ketujuh spesimen memperlihatkan mekanisme kegagalan yang kompleks, yang merupakan kombinasi dari *matrix cracking*, delaminasi, *fiber pull-out*, *fracture surface*, serta *interfacial failure*. Perbedaan tingkat kerusakan pada setiap spesimen dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti distribusi resin, orientasi serat, kualitas impregnasi, adanya *void*, serta kekuatan adhesi antara serat carbon fiber dan matriks resin selama proses fabrikasi komposit

4.3.5 Grafik Hasil Pengujian Tensile

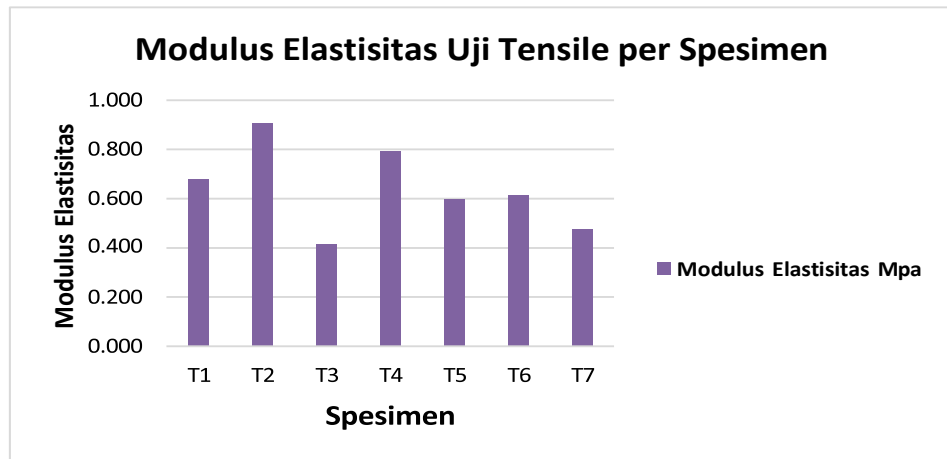
Penjelasan grafik dilakukan untuk menampilkan kecenderungan data hasil pengujian tensile serta mendeskripsikan temuan yang diperoleh dari grafik tersebut sehingga pembaca lebih mudah memahami informasi visual yang disajikan. Grafik dibuat berdasarkan data pada tabel dengan memperlihatkan perbandingan nilai tegangan lentur dan modulus elastisitas pada setiap spesimen. Adapun penyajian grafik hasil pengujian tensile ditunjukkan sebagai berikut:

Tabel 4. 23 Hasil Pengujian Tensile

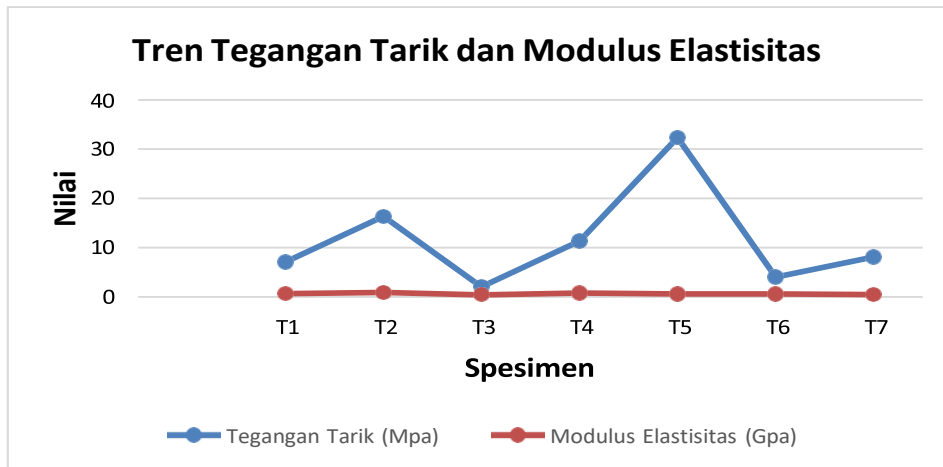
Spesimen	Tegangan Tarik (Mpa)	Modulus Elastisitas (Gpa)
T1	7.048	0.680
T2	16.36	0.908
T3	2.050	0.416
T4	11.36	0.792
T5	32.36	0.597
T6	4.014	0.614
T7	8.092	0.477



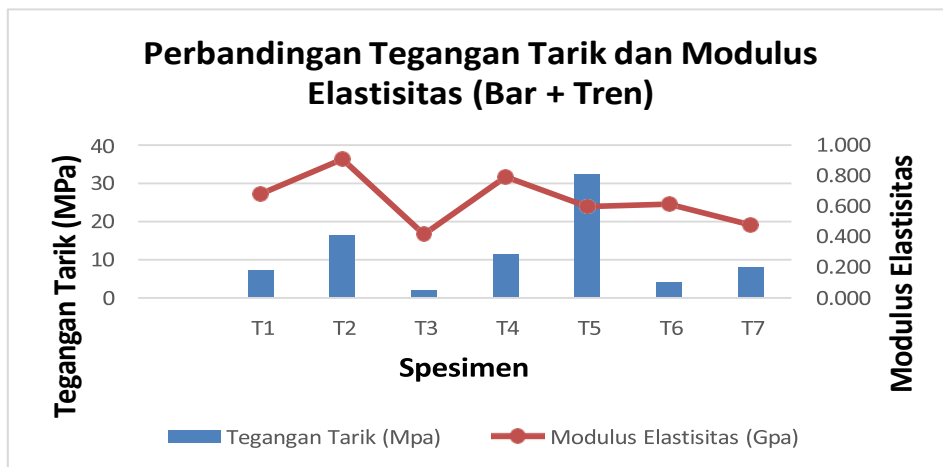
Gambar 4. 25 Grafik Tegangan Tarik per Spesimen



Gambar 4. 26 Grafik Modulus Elastisitas Uji Tensile per Spesimen



Gambar 4. 27 Tren Tegangan Tarik dan Modulus Elastisitas



Gambar 4. 28 Perbandingan Tegangan Tarik dan Modulus Elastisitas (Bar + Tren)

Grafik tegangan tarik menunjukkan kemampuan material dalam menahan beban tarik aksial (*tensile loading*) sebelum mengalami kegagalan struktur berupa putus, dengan nilai tertinggi pada spesimen T5 yang berada di kisaran 32,5 MPa. Berdasarkan grafik batang, terlihat bahwa tren tegangan tarik mengalami fluktuasi yang cukup signifikan, di mana nilai awal meningkat dari T1 ke T2, kemudian menurun tajam hingga mencapai nilai terendah pada spesimen T3 sekitar 2 MPa. Setelah itu, nilai tegangan kembali meningkat cukup besar pada T4 hingga mencapai puncaknya di T5, lalu menurun kembali pada T6 dan sedikit meningkat pada T7. Variasi ini menunjukkan adanya pengaruh yang cukup besar dari kondisi maupun komposisi fabrikasi terhadap sifat mekanis material. Pada spesimen T5, rasio serat dan matriks diduga berada pada kondisi paling optimal (*optimum fiber to matrix ratio*) serta didukung oleh ikatan antarmuka (*interfacial bonding*) yang kuat, sehingga distribusi beban tarik pada penampang material dapat berlangsung secara lebih efektif dibandingkan spesimen lainnya.

Grafik modulus elastisitas pada uji tarik menggambarkan tingkat kekakuan spesimen

dalam menahan deformasi elastis saat diberikan beban tarik aksial. Data menunjukkan adanya pola fluktuatif pada spesimen T1 hingga T7, dengan nilai tertinggi diperoleh pada spesimen T2, yaitu sekitar 0,91 GPa (tercantum MPa pada legenda grafik). Variasi nilai kekakuan ini diduga dipengaruhi oleh ketidakseragaman ikatan antar lapisan serat dalam material. Pada grafik berwarna ungu, terlihat bahwa spesimen T2 dan T4 memiliki nilai modulus yang jauh lebih tinggi dibandingkan spesimen lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi serat penguat pada T2 dan T4 lebih rapat dan homogen, sehingga mampu mengurangi potensi terbentuknya *void* maupun delaminasi mikro serta meningkatkan kekakuan struktur secara signifikan.

Pada grafik tren tegangan tarik dan modulus elastisitas terlihat adanya perbedaan skala yang cukup besar antara garis biru (MPa) dan garis merah (GPa). Garis merah berada jauh lebih rendah dan cenderung stabil pada kisaran 0,41 hingga 0,91. Dari visualisasi tersebut tampak bahwa lonjakan tajam pada garis biru tidak selalu diikuti oleh perubahan signifikan pada garis merah. Sebagai contoh, pada spesimen T5, peningkatan drastis pada tegangan tarik hingga mencapai nilai tertinggi justru tidak diikuti kenaikan modulus elastisitas, yang cenderung tetap. Fenomena ini menunjukkan bahwa material dengan kekuatan tarik tinggi tidak selalu memiliki peningkatan kekakuan elastis secara linier, sekaligus menguatkan konsistensi hasil pengujian yang diperoleh.

Grafik kombinasi tersebut menunjukkan bahwa batang berwarna biru merepresentasikan nilai tegangan tarik maksimum yang dapat ditahan material sebelum mengalami patah atau putus total, sedangkan garis merah menggambarkan modulus elastisitas atau tingkat kekakuan dalam menahan deformasi awal akibat beban tarik aksial. Kedua grafik tersebut memperlihatkan pola yang fluktuatif dan cenderung berlawanan pada spesimen T1 hingga T7, yang dipengaruhi oleh karakteristik mikrostruktur hasil proses fabrikasi. Hal ini terlihat pada spesimen T5 yang memiliki nilai kekuatan tarik tertinggi sebesar 32,21 MPa, namun menunjukkan modulus elastisitas yang relatif lebih rendah sekitar 0,60 GPa karena sifat penampang yang lebih mampu berdeformasi saat menerima beban maksimum. Sebaliknya, spesimen T2 memiliki nilai tegangan tarik yang sedang sebesar 16,33 MPa, tetapi justru menunjukkan kekakuan tertinggi hingga 0,91 GPa. Kondisi ini mengindikasikan bahwa susunan serat penguat pada T2 lebih rapat, padat, dan homogen, sehingga mampu meningkatkan ketahanan terhadap deformasi awal, namun di sisi lain membuat material menjadi lebih getas (*brittle*) dan membatasi kemampuannya dalam menahan beban tarik maksimum yang lebih tinggi.

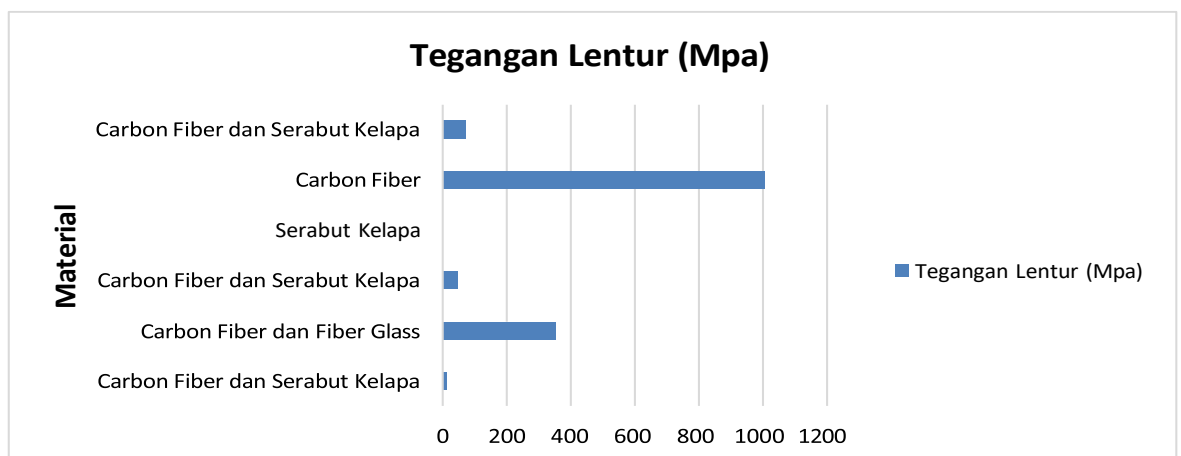
Secara umum, tren data menunjukkan bahwa spesimen T5 memiliki kinerja terbaik dalam hal kekuatan tarik (*tensile strength*) untuk menahan beban tarik aksial maksimum, sedangkan spesimen T2 lebih unggul pada aspek kekakuan atau modulus elastisitas. Peningkatan nilai tegangan tarik yang tidak selalu diikuti oleh kenaikan modulus elastisitas pada beberapa spesimen dipengaruhi oleh perubahan karakteristik mikrostruktur akibat perbedaan kondisi proses fabrikasi. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa tingginya kekuatan tarik tidak selalu sebanding dengan kekakuan material. Susunan serat penguat yang lebih rapat dan homogen pada spesimen tertentu cenderung meningkatkan kekakuan dalam menahan deformasi awal, tetapi pada saat yang sama dapat membuat material lebih getas (*brittle*) sehingga membatasi kemampuan material dalam mencapai beban tarik maksimum secara optimal.

4.3.6 Komparasi Tegangan Tarik Material Komposit Lambung Kapal

Kekuatan tarik (*tensile strength*) dan elastisitas merupakan parameter penting dalam pemilihan material lambung perahu nelayan, karena selama pengoperasian, lambung perahu akan menerima beban tarik aksial serta tegangan dinamis (*dynamic loading*) akibat hempasan gelombang. Dalam penelitian ini, penggunaan hibridasi serat karbon (*carbon fiber*) dengan serat alam berupa serabut kelapa bertujuan untuk mengkaji sejauh mana kombinasi kedua jenis serat tersebut dapat meningkatkan sifat mekanis lambung perahu terhadap beban tarik di lingkungan perairan, sekaligus sebagai alternatif material yang lebih ekonomis. Selanjutnya, nilai kekuatan tarik dan modulus elastisitas dari komposit hibrid serat karbon dan serabut kelapa yang diperoleh dari pengujian tarik (*tensile test*) dibandingkan dengan material komposit yang umum digunakan pada lambung perahu tradisional saat ini. Perbandingan ini dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas hasil eksperimen yang telah dilaksanakan. Berikut data komparasi yang diperoleh:

Tabel 4. 24 Data Komparasi Material Komposit

Sumber Data	Material	Matriks	Tegangan Tarik (MPa)
Hasil Penelitian Saat Ini (2026)	Carbon Fiber + Serabut Kelapa	Epoxy	11.61
(K. Kumar et al., 2024)	Carbon Fiber + Fiber Glass	Epoxy	351.9
(Singh et al., 2020b)	Carbon Fiber + Serabut Kelapa	Epoxy	45.85
(Hasan, Horváth, Kóczán, et al., 2021)	Serabut Kelapa	Epoxy	0.53
(Hu et al., 2023)	Carbon Fiber	Epoxy	1004.4
(Junus et al., 2025)	Carbon Fiber + Serabut Kelapa	Epoxy	70.92



Gambar 4. 29 Grafik Komparasi Kekuatan Impak Material Komposit

Tabel dan grafik tersebut menyajikan perbandingan performa tegangan tarik antara spesimen hasil penelitian komposit Carbon Fiber + Serabut Kelapa dengan matriks epoxy pada penelitian ini dengan berbagai material komposit sejenis dari studi terdahulu yang

relevan. Berdasarkan data komparasi, spesimen hasil penelitian tahun 2026 menunjukkan nilai kekuatan tarik sebesar 11,61 MPa. Nilai tersebut lebih rendah jika dibandingkan dengan hasil penelitian Singh et al. (2020b) yang mencapai 45,85 MPa serta Junus et al. yang memperoleh nilai sebesar 70,92 MPa. Perbedaan ini mengindikasikan adanya variasi pada orientasi sudut anyaman serat, dominasi fraksi volume serat alam pada penelitian ini, serta kemungkinan terbentuknya *void* (rongga udara) mikro setelah proses fabrikasi yang dapat menghambat efisiensi transfer tegangan tarik pada antarmuka (*interfacial*) antara serat dan matriks.

Di sisi lain, grafik menunjukkan perbedaan kekuatan yang sangat mencolok pada penggunaan serat sintetis murni maupun kombinasi antar serat sintetis. Penelitian Hu et al. (2023) yang menggunakan carbon fiber murni mencatat nilai tertinggi sebesar 1004,4 MPa, diikuti oleh komposit hibrida sintetis carbon fiber + fiberglass pada penelitian K. Kumar et al. sebesar 351,9 MPa. Tingginya nilai tersebut dapat dipahami karena serat sintetis memiliki struktur yang lebih homogen, lurus, serta memiliki kekuatan intrinsik (*intrinsic strength*) yang jauh lebih tinggi dibandingkan serat alam. Sebaliknya, komposit berbasis serabut kelapa murni tanpa penguat karbon, seperti pada penelitian Hasan et al., hanya menunjukkan nilai terendah sebesar 0,53 MPa. Dengan demikian, meskipun komposit hibrida pada penelitian ini memiliki nilai tegangan tarik yang lebih rendah dibandingkan komposit berbasis serat sintetis murni, kombinasi dengan serabut kelapa tetap mampu meningkatkan performa secara signifikan dibandingkan komposit serat alam tunggal. Hal ini menunjukkan bahwa material tersebut masih memiliki potensi sebagai kompromi yang baik antara efisiensi biaya dan kekuatan operasional untuk aplikasi lambung perahu.

Perlu dipahami bahwa perbandingan nilai tegangan tarik pada tabel dan grafik tersebut bersifat indikatif dan tidak dapat disamakan secara langsung, karena terdapat perbedaan standar pengujian yang digunakan (misalnya ASTM D638 atau standar lainnya), variasi jumlah serta ketebalan lapisan serat, perbedaan metode fabrikasi, serta dimensi spesimen pada masing-masing penelitian. Oleh karena itu, komparasi ini dimaksudkan untuk memberikan gambaran posisi relatif material komposit yang dikembangkan terhadap material pembanding dari berbagai jurnal ilmiah terdahulu, bukan untuk menyatakan bahwa seluruh kondisi pengujian memiliki kesetaraan secara mutlak.

4.3.7 Sintesis Hasil Pengujian Mekanik Komposit Carbon Fiber Serabut Kelapa

Berdasarkan keseluruhan hasil pengujian lentur (three-point bending) dan pengujian tarik (tensile), dapat diketahui bahwa komposit hibrida Carbon Fiber dan serabut kelapa memiliki kemampuan yang baik dalam menahan berbagai jenis pembebanan mekanik yang berpotensi terjadi pada struktur lambung perahu nelayan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa material komposit yang dikembangkan mampu mempertahankan integritas strukturnya ketika menerima beban tarik maupun beban lentur, yang ditunjukkan melalui nilai tegangan maksimum dan modulus elastisitas yang diperoleh pada setiap pengujian. Keberadaan carbon fiber sebagai material penguat utama memberikan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan kekuatan dan kekakuan komposit, sehingga material mampu menahan pembebanan tanpa mengalami deformasi berlebihan. Di sisi lain, penggunaan serabut kelapa sebagai serat alami memberikan kontribusi terhadap peningkatan kemampuan deformasi, penyerapan energi, serta ketahanan terhadap propagasi retak yang

dapat terjadi selama proses pembebanan. Sinergi antara kedua jenis serat tersebut menghasilkan karakteristik mekanik yang saling melengkapi sehingga komposit yang dihasilkan tidak hanya memiliki kekuatan yang memadai, tetapi juga memiliki tingkat kelenturan yang baik.

Berdasarkan perbandingan hasil kedua pengujian, performa mekanik komposit pada pengujian lentur menunjukkan kecenderungan yang lebih baik dibandingkan pada pengujian tarik. Hal ini mengindikasikan bahwa material memiliki kemampuan yang lebih tinggi dalam menerima dan mendistribusikan beban lentur dibandingkan menahan pembebanan tarik secara langsung. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa komposit hibrida Carbon Fiber–serabut kelapa memiliki tingkat fleksibilitas yang cukup baik tanpa kehilangan kemampuan strukturalnya dalam menahan beban. Sifat ini menjadi salah satu keunggulan penting karena struktur lambung perahu nelayan selama beroperasi di perairan lebih sering mengalami kombinasi beban lentur akibat pengaruh gelombang, arus, distribusi muatan, serta getaran yang terjadi secara berulang dibandingkan menerima beban tarik murni. Dengan kemampuan menahan deformasi lentur yang baik, material akan lebih mampu beradaptasi terhadap kondisi operasional di laut dan mengurangi risiko terjadinya kerusakan struktur secara tiba-tiba.

Selain menunjukkan performa mekanik yang baik, hasil penelitian ini juga memperlihatkan bahwa pemanfaatan serabut kelapa sebagai material penguat alami mampu memberikan nilai tambah terhadap pengembangan material komposit yang lebih ramah lingkungan. Penggunaan serat alam lokal tidak hanya berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap material sintetis, tetapi juga mendukung konsep keberlanjutan melalui pemanfaatan sumber daya yang melimpah dan dapat diperbarui. Dengan mempertimbangkan hasil pengujian lentur yang lebih dominan, kemampuan menahan beban tarik yang masih memadai, karakteristik material yang relatif ringan, serta aspek keberlanjutan yang dimiliki, komposit hibrida Carbon Fiber–serabut kelapa dapat dipandang sebagai material alternatif yang menjanjikan untuk diaplikasikan pada konstruksi lambung perahu nelayan. Temuan ini sekaligus menunjukkan bahwa kombinasi serat sintetis dan serat alam mampu menghasilkan material komposit yang tidak hanya memenuhi kebutuhan performa mekanik, tetapi juga sejalan dengan pengembangan teknologi perkapalan yang lebih efisien, ekonomis, dan berkelanjutan di masa mendatang.

Halaman ini sengaja dikosongkan