

BAB 4

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Gambaran Umum

Penelitian ini berfokus pada pengujian sifat mekanik material *High Density Polyethylene* (HDPE) yang digunakan sebagai bahan uji dalam penelitian. Material HDPE merupakan salah satu jenis polimer termoplastik yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri karena memiliki sifat ringan, tahan terhadap korosi, serta memiliki ketahanan yang baik terhadap lingkungan yang lembab maupun air laut. Dalam penelitian ini material HDPE diproses menjadi beberapa spesimen uji yang kemudian diberikan perlakuan panas sebelum dilakukan pengujian sifat mekanik.

Objek penelitian berupa spesimen material HDPE yang dibuat sesuai dengan standar pengujian tarik ASTM D638. Spesimen tersebut dibagi ke dalam beberapa variasi perlakuan, yaitu spesimen HDPE tanpa perlakuan, spesimen HDPE dengan perlakuan panas, serta spesimen HDPE dengan perlakuan panas yang dikombinasikan dengan proses pengelasan menggunakan metode *hot plate welding*. Setiap spesimen kemudian diuji menggunakan metode uji tarik untuk memperoleh data parameter mekanik seperti kekuatan tarik dan regangan putus.

Lokasi penelitian terdiri dari dua tempat utama yang mendukung pelaksanaan penelitian. Proses pengujian material dilakukan di Laboratorium Material Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan, Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro, Semarang. Laboratorium ini digunakan untuk kegiatan persiapan spesimen, perlakuan panas material, serta pelaksanaan pengujian tarik menggunakan peralatan uji yang tersedia. Penelitian dilaksanakan dari bulan November 2025 hingga bulan Maret 2026.



Gambar 4. 1 Lokasi Penelitian Desa Timbulsloko

Selain itu, penelitian ini juga berkaitan dengan kondisi perahu nelayan di Desa Timbulsloko, Kecamatan Sayung, Kabupaten Demak, Jawa Tengah, yang merupakan wilayah pesisir dengan aktivitas perikanan yang cukup aktif. Wilayah tersebut dikenal sebagai daerah yang masyarakatnya banyak memanfaatkan perahu nelayan dalam kegiatan penangkapan ikan di perairan sekitar. Kondisi lingkungan pesisir serta penggunaan perahu oleh masyarakat

nelayan menjadi bagian dari konteks objek penelitian yang berkaitan dengan penerapan material HDPE pada konstruksi perahu nelayan skala kecil.

4.2 Proses Pembuatan Spesimen Uji Tarik

4.2.1 Pemilihan Spesifikasi Plat HDPE

Pada penelitian eksperimen ini material yang akan digunakan adalah material HDPE jenis plat, dengan ketebalan plat 10 mm.



Gambar 4. 2 Gambar Material HDPE

4.2.2 Proses Pemanasan (*Special Treatment*)

Perlakuan suhu pada bahan High Density Polyethylene (HDPE) dilakukan untuk mengubah karakter fisik bahan tersebut agar contoh dapat menyesuaikan dengan bentuk desain yang telah ditentukan dan mempertahankan bentuknya setelah proses pembuatan. Prosedur ini memanfaatkan sifat termoplastik HDPE, yang akan menjadi lunak saat dipanaskan pada temperatur tertentu dan kembali mengeras setelah menjadi dingin.

4.2.2.1 Alat dan Bahan

- a. Wadah Pemanasan : Digunakan sebagai tempat bagi oli.



- b. Torch : Digunakan untuk alat pemanas.



Gambar 4. 3 Gambar Torch

- c. Tang Penjepit : Alat tangan yang digunakan untuk menjepit spesimen.



Gambar 4. 4 Tang Penjepit

- d. *Thermo Gun* : Alat yang digunakan untuk mengukur suhu spesimen pada saat digunakan



Gambar 4. 5 *Thermo Gun*

- e. Oli : Bahan perantara panas.



Gambar 4. 6 Oli

4.2.2.2 Proses Pemanasan

- a. Memanaskan oli yang sudah di masukan pada wadah. Kemudian panaskan oli hingga tinggi dengan minimal suhu $<120^{\circ}$.



Gambar 4. 7 Proses Pemanasan Oli

- b. Panaska plat HDPE dengan cara memasukan pada wadah berisikan oli panas.



Gambar 4. 8 Proses Pemanasan HDPE

- c. Memastikan plat hdpe sudah mencapai suhu yang telah ditentukan 120° - 140°.



Gambar 4. 9 Keterangan Suhu HDPE

- d. Plat ditebuk untuk memastikan sifat material telah berubah menjadi lebih elastis.



Gambar 4. 10 Keterangan Plat Melunak

- e. Proses resting hingga ke suhu normal.

4.2.3 Proses Pengelasan

4.2.3.1 Alat dan Bahan

- Material : HDPE (*High – Density Polyethylene*) berukuran Tebal 10 mm, Panjang 30 cm, dan Lebar 20 cm.
- Hot Air Welding Gun (HDPE)*
- Alat keselamatan (kacamata, sarung tangan)

d. Gerindra potong

4.2.3.2 Proses Pembuatan Bevel dan Pengelasan

- a. Pembuatan *bevel* : proses ini berfungsi untuk memastikan penetrasi las yang dalam, dan maksimal. *Bevel* juga memperkuat sambungan dengan ruang yang lebih besar untuk *filler*, memastikan akar las (*root*) tersambung sempurna. Pembuatan *bevel* menggunakan standar DVS 2207-3 dengan sudut 60° - 70° (dengan masing-masing sisi 30° - 35°)
- b. Proses pengelasan *root*.



Gambar 4. 11 Proses Pengelasan *Root*

c. Proses pengelasan *body*



Gambar 4. 12 Proses Pengelasan *Filler*

d. Inspeksi Visual : Menilai *bead* las (bentuk, dan kerataan).

4.2.4 Proses Pembuatan Spesimen

Dalam pembuatan spesimen, dalam penelitian kali tidak terdapat perbedaan dalam bentuk atau dimensi, meskipun terdapat 4 variable spesimen. Setiap proses pembentukan dilaksanakan menggunakan standar bentuk ASTM D638.

1. Pemotongan plat menjadi ukuran *Length Overall* (LO) 165 mm, dan *Width overall* (WO) 19 mm. Menggunakan gergaji potong dan gerindra.
2. Pembentukan *radius fillet* sebesar 76° menggunakan gerindra potong.
3. Kemudian haluskan setiap spesimen menggunakan ampelas.

4.2.5 Hasil Proses Pembuatan Spesimen

Setelah melakukan penentuan desain yang akan digunakan berdasarkan standar ASTM D638 dengan ukuran 165mm x 13mm x 10 mm dengan radius *fillet* 76 derajat. Pemotongan dan pembuatan spesimen uji tarik dilakukan di *Workshop* Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan, Sekolah Vokasi.

Berikut adalah hasil dari spesimen dengan dan tanpa perlakuan khusus dari hasil pengujian yang dilakukan oleh penulis:

1. Tanpa Pengelasan dan Tanpa Pemanasan



Gambar 4. 13 Spesimen Tanpa Pengelasan dan Tanpa Pemanasan

2. Tanpa Pengelasan dengan Pemanasan



Gambar 4. 14 Spesimen Tanpa Pengelasan dengan Pemanasan

3. Dilas dan Tanpa Pemanasan



Gambar 4. 15 Spesimen Dilas dan Tanpa Pemanasan

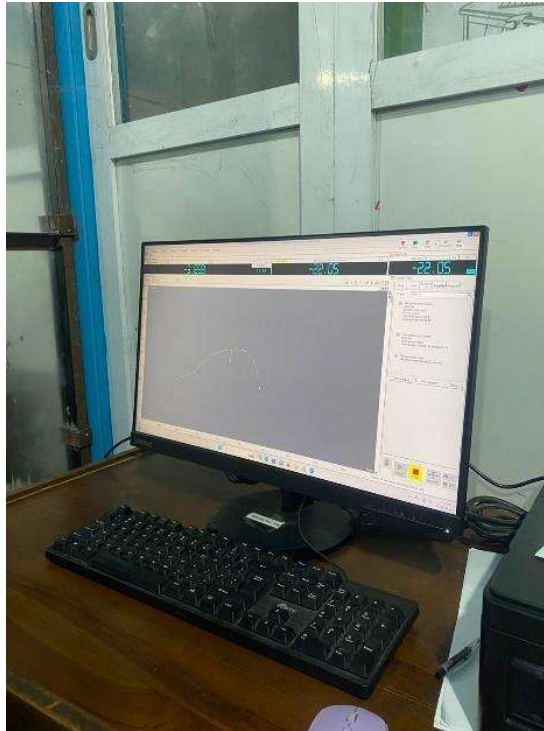
4. Dilas dengan Pemanasan



Gambar 4. 16 Spesimen Dilas dengan Pemanasan

4.3 Proses Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan hasil kekuatan tarik dari suatu sampel. Standar uji yang digunakan dalam pengujian tarik ini yaitu ASTM D638 dan alat yang dipakai *Electromechanical Universal Testing Machine*. Dari pengujian ini akan menghasilkan grafik tegangan dengan satuan MPa dan grafik regangan dengan satuan % untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas. Pelaksanaan uji tarik dilakukan di laboratorium *welding school* Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan Universitas Diponegoro seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 4. 17 Proses Uji Tarik Menggunakan Alat Uji Tarik



Gambar 4. 18 Proses Uji Tarik Menggunakan Alat Uji Tarik

4.4 Hasil Kekuatan Uji Tarik

Standar yang digunakan dalam pembuatan sampel uji ialah ASTM D638 dengan menyambung antara plat dengan menggunakan proses pengelasan *Plastic Welding*. Uji tarik ialah pengujian secara mekanis yang menggunakan penerapan gaya tarik pada kedua ujung setiap specimen. Tujuan dari uji tarik ini untuk memahami kekuatan tarik dari setiap sampel spesimen yang memiliki variasi perlakuan yang berbeda dan mengidentifikasi beban gaya tarik

maksimal yang diterima. Hasil pengujian tarik sambungan plat HDPE disajikan dalam tabel di bawah ini.

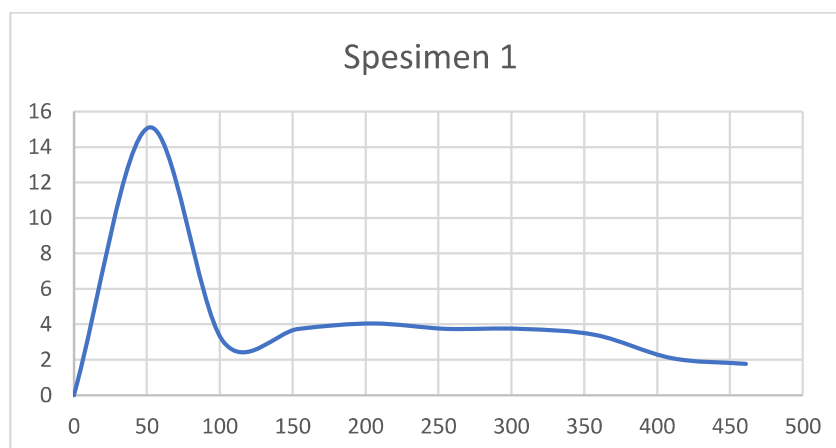
4.4.1 Tanpa Pengelasan dan Tanpa Pemanasan

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

a) Sampel 1

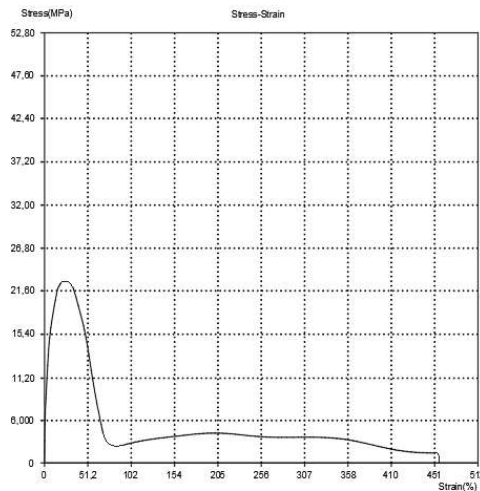
Table 4.1 Nilai Regangan dan Tegangan Spesimen 1

Regangan (%)	Tegangan (MPa)
51,2	15,1
102	3,07
154	3,72
205	4,05
256	3,72
307	3,72
358	3,4
410	2,1
461	1,77



Gambar 4. 19 Grafik Regangan dan Tegangan Dari Hasil Uji Tarik Pada Spesimen 1

Gambar berikut merupakan grafik regangan dan tegangan dari hasil uji tarik pada spesimen 1. Kekuatan tarik tertinggi terjadi pada nilai tegangan 22,9 MPa dan titik patah terjadi pada regangan 473,8%.



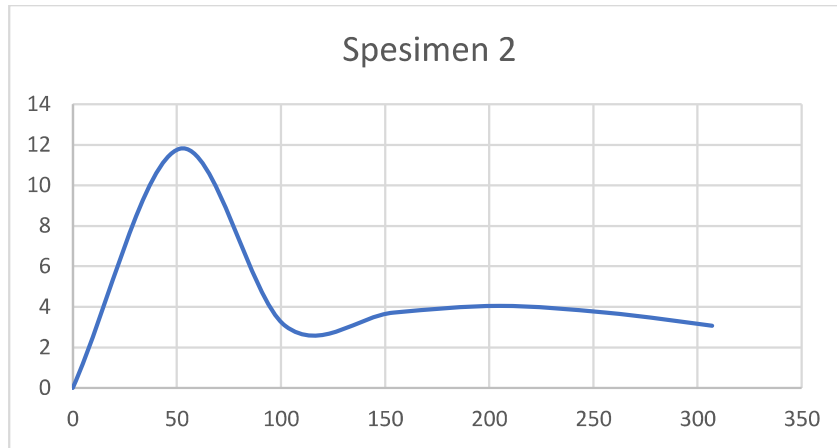
Gambar 4. 20 Grafik Tegangan Hasil Uji Tarik Spesimen 1

Dari gambar diatas dapat diartikan bahwa setiap tegangan yang diberikan pada specimen 1 berpengaruh terhadap pertambahan panjang hingga sampai titik patah. Tegangan tertinggi yang dicapai pada specimen ini mencapai 22,9 MPa dan regangan maksimal yang diterima 473,8%. Secara visual, titik *yield* diidentifikasi pada 6,00 MPa dan *elongation yield* pada 1,6%.

b) Sampel 2

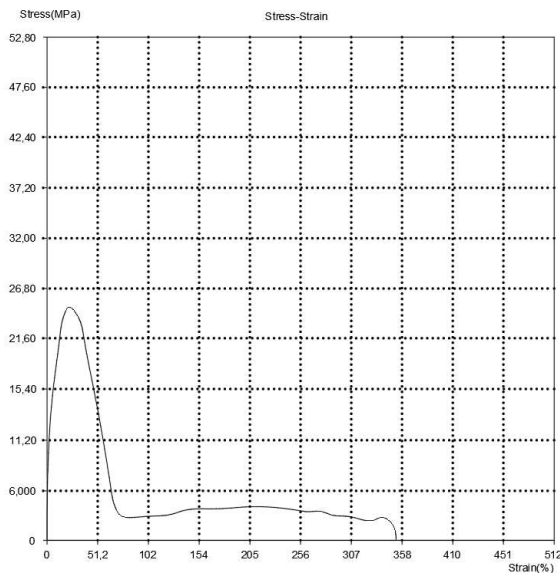
Table 4.2 Nilai Regangan dan Tegangan Spesimen 2

Regangan (%)	Tegangan (MPa)
51,2	11,85
102	3,07
154	3,72
205	4,05
256	3,75
307	3,07



Gambar 4. 21 Grafik Regangan dan Tegangan Dari Hasil Uji Tarik Pada Spesimen 2

Gambar berikut merupakan grafik regangan dan tegangan dari hasil uji tarik pada spesimen 2. Kekuatan tarik tertinggi terjadi pada nilai tegangan 24,5 MPa dan titik patah terjadi pada regangan 345,4%.



Gambar 4. 22 Grafik Tegangan Hasil Uji Tarik Spesimen 2

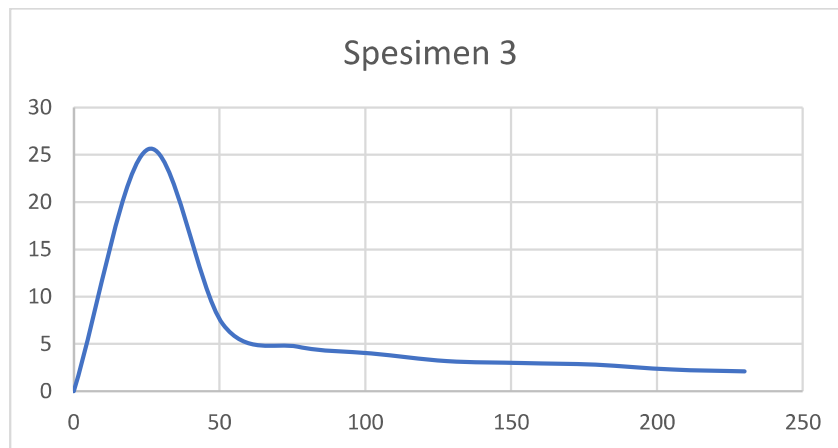
Dari gambar diatas dapat diartikan bahwa setiap tegangan yang diberikan pada specimen 2 berpengaruh terhadap penambahan panjang hingga sampai titik patah. Tegangan tertinggi yang dicapai pada specimen ini mencapai 24,5 MPa dan regangan maksimal yang diterima 345,4%. Secara visual, titik *yield* diidentifikasi pada 12,80 MPa dan *elongation yield* pada 1,42%.

c) Sampel 3

Table 4.3 Nilai Regangan dan Tegangan Spesimen 3

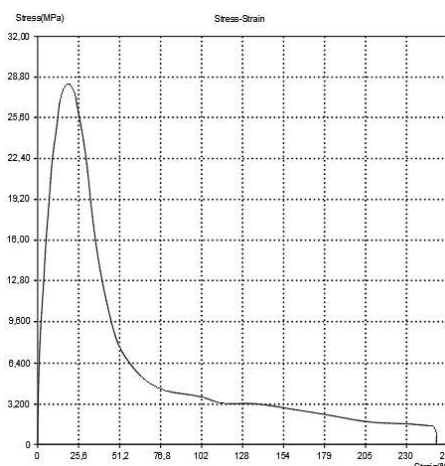
Regangan (%)	Tegangan (MPa)
25,6	25,6

51,2	7,1
76,8	4,7
102	4,0
128	3,2
154	3,0
179	2,8
205	2,3
230	2,1



Gambar 4. 23 Grafik Regangan dan Tegangan Dari Hasil Uji Tarik Pada Spesimen 3

Gambar berikut merupakan grafik regangan dan tegangan dari hasil uji tarik pada spesimen 3. Kekuatan tarik tertinggi terjadi pada nilai tegangan 27,0 MPa dan titik patah terjadi pada regangan 240%.



Gambar 4. 24 Grafik Tegangan Hasil Uji Tarik Spesimen 3

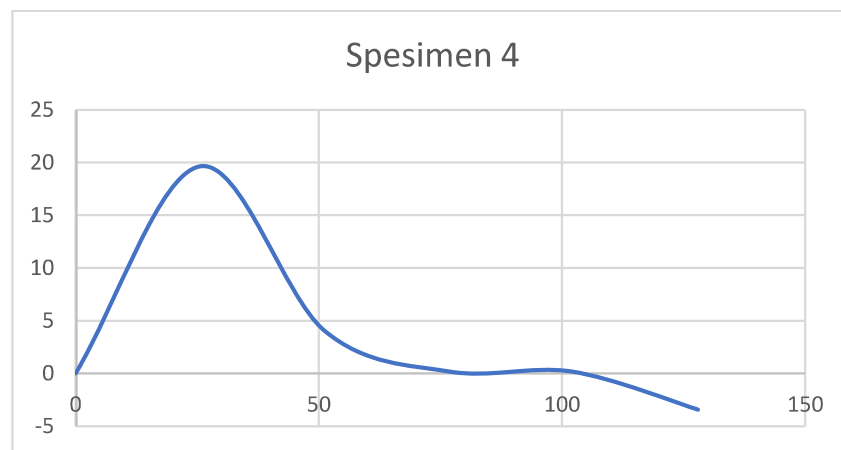
Dari gambar diatas dapat diartikan bahwa setiap tegangan yang diberikan pada specimen 3 berpengaruh terhadap pertambahan panjang hingga sampai titik patah. Tegangan tertinggi yang dicapai pada specimen ini mencapai 27,0 MPa dan regangan maksimal yang diterima

240%. Secara visual, titik *yield* diidentifikasi pada 9,60 MPa dan *elongation yield* pada 3,2%.

d) Sampel 4

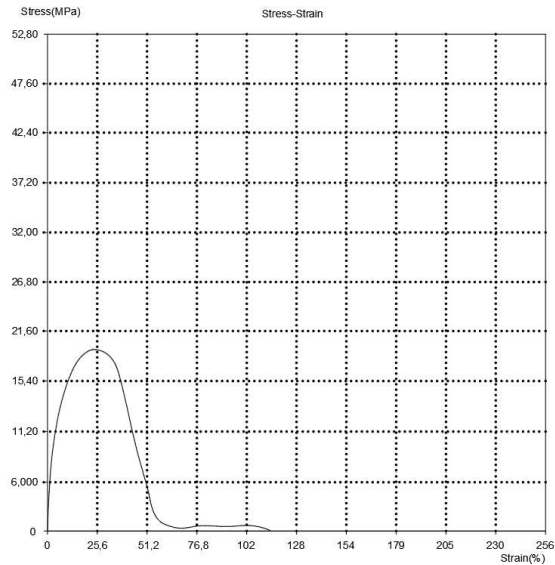
Table 4.4 Nilai Regangan dan Tegangan Spesimen 4

Regangan (%)	Tegangan (MPa)
25,6	19,65
51,2	4,05
76,8	0,175
102	0,175



Gambar 4. 25 Grafik Regangan dan Tegangan Dari Hasil Uji Tarik Pada Spesimen 4

Gambar berikut merupakan grafik regangan dan tegangan dari hasil uji tarik pada spesimen 4. Kekuatan tarik tertinggi terjadi pada nilai tegangan 19,65 MPa dan titik patah terjadi pada regangan 110%.



Gambar 4. 26 Grafik Regangan dan Tegangan Hasil Uji Tarik Spesimen 4

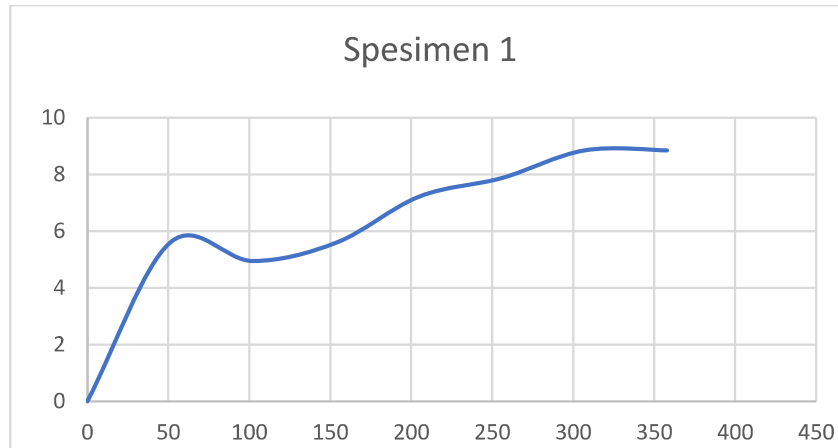
Dari gambar diatas dapat diartikan bahwa setiap tegangan yang diberikan pada specimen 4 berpengaruh terhadap pertambahan panjang hingga sampai titik patah. Tegangan tertinggi yang dicapai pada specimen ini mencapai 19,65 MPa dan regangan maksimal yang diterima 110%. Secara visual, titik *yield* diidentifikasi pada 8,00 MPa dan *elongation yield* pada 1,6%.

4.4.2 Tanpa Pengelasan dengan Pemanasan

a) Sampel 1

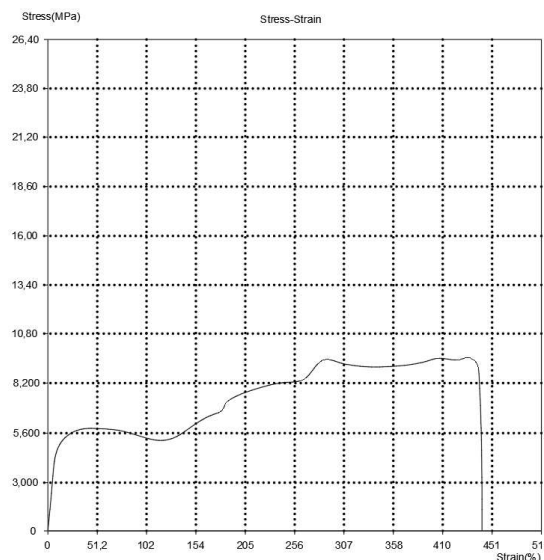
Table 4.5 Nilai Regangan dan Tegangan Spesimen 1

Regangan (%)	Tegangan (MPa)
51,2	5,6
102	4,95
154	5,6
205	7,225
256	7,875
307	8,85
358	8,85
410	9,175



Gambar 4. 27 Grafik Regangan dan Tegangan Dari Hasil Uji Tarik Pada Spesimen 1

Gambar berikut merupakan grafik regangan dan tegangan dari hasil uji tarik pada spesimen 1. Kekuatan tarik tertinggi terjadi pada nilai tegangan 9,2 MPa dan titik patah terjadi pada regangan 448,2%.



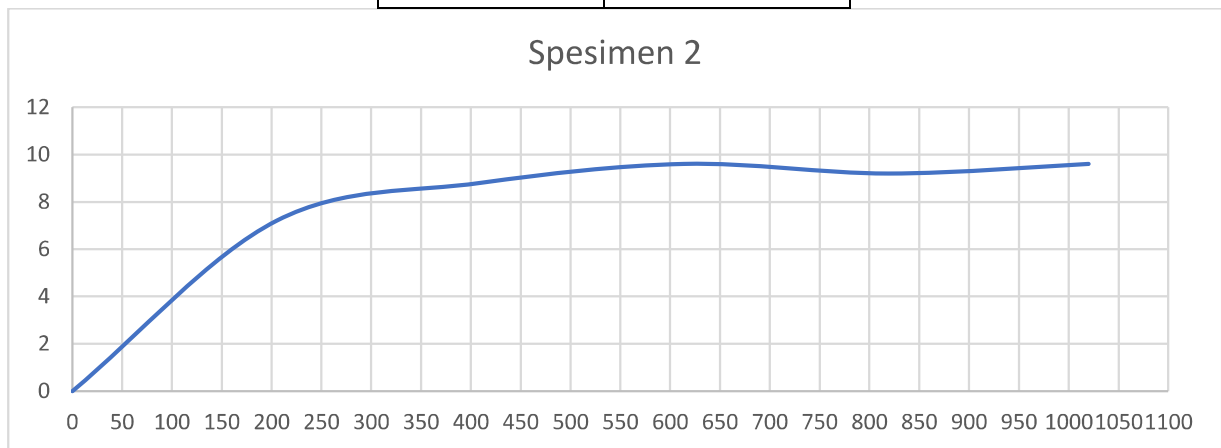
Gambar 4. 28 Grafik Tegangan Hasil Uji Tarik Spesimen 1

Dari gambar diatas dapat diartikan bahwa setiap tegangan yang diberikan pada specimen 1 berpengaruh terhadap pertambahan panjang hingga sampai titik patah. Tegangan tertinggi yang dicapai pada specimen ini mencapai 9,2 MPa dan regangan maksimal yang diterima 448,2%. Secara visual, titik *yield* diidentifikasi pada 4,90 MPa dan *elongation yield* pada 6,4%.

b) Sampel 2

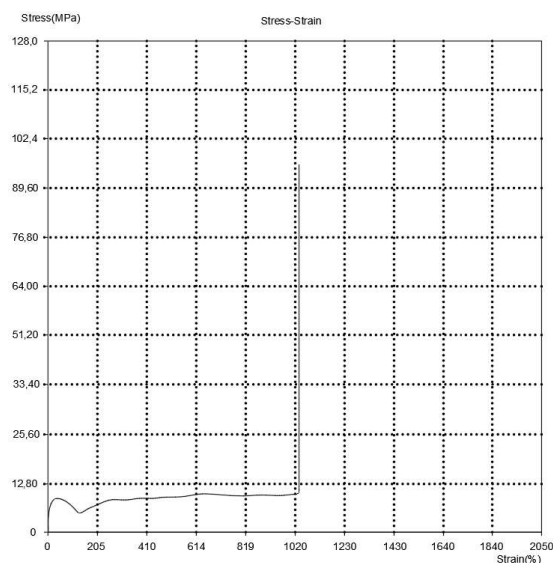
Table 4.6 Nilai Regangan dan Tegangan Spesimen 2

Regangan (%)	Tegangan (MPa)
205	7,2
410	8,8
614	9,6
819	9,2
1020	9,6



Gambar 4. 29 Grafik Regangan dan Tegangan Dari Hasil Uji Tarik Pada Spesimen 2

Gambar berikut merupakan grafik regangan dan tegangan dari hasil uji tarik pada spesimen 2. Kekuatan tarik tertinggi terjadi pada nilai tegangan 10,4 MPa dan tidak mengalami patah dikarenakan sudah mencapai regangan maksimal yang dapat dilakukan oleh mesin uji tarik (1020%).



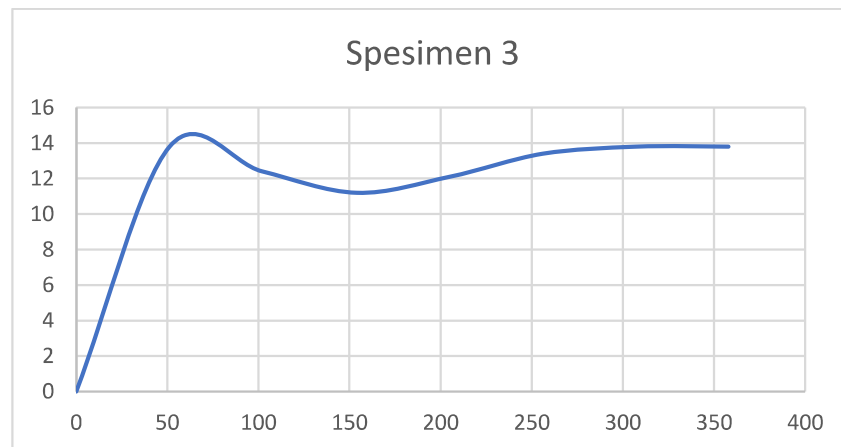
Gambar 4. 30 Grafik Tegangan Hasil Uji Tarik Spesimen 2

Dari gambar diatas dapat diartikan bahwa setiap tegangan yang diberikan pada specimen 2 berpengaruh terhadap pertambahan panjang hingga sampai titik patah. Tegangan tertinggi yang dicapai pada specimen ini mencapai 10,4 Mpa dan tidak mengalami patah dikarenakan sudah mencapai regangan maksimal yang dapat dilakukan oleh mesin uji tarik (1020%). Secara visual, titik *yield* diidentifikasi pada 4,40 MPa dan *elongation yield* pada 6%.

c) Sampel 3

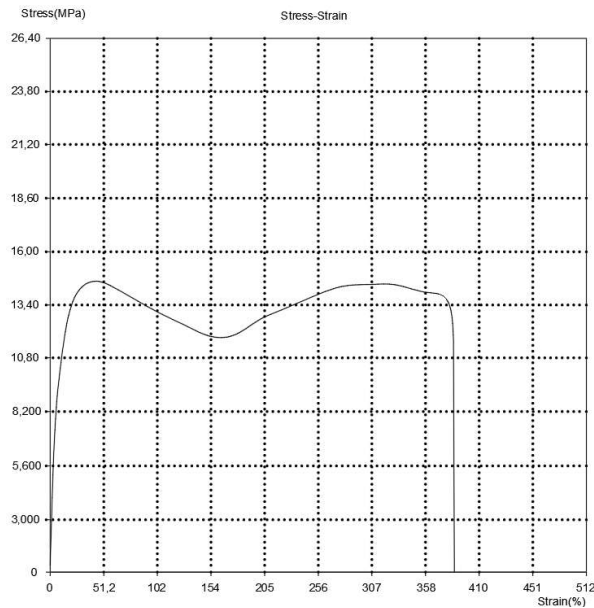
Table 4.7 Nilai Regangan dan Tegangan Spesimen 3

Regangan (%)	Tegangan (MPa)
51,2	13,88
102	12,42
154	11,2
205	12,1
256	13,4
307	13,8
358	13,4



Gambar 4. 31 Grafik Regangan dan Tegangan Dari Hasil Uji Tarik Pada Spesimen 3

Gambar berikut merupakan grafik regangan dan tegangan dari hasil uji tarik pada spesimen 3. Kekuatan tarik tertinggi terjadi pada nilai tegangan 14 MPa dan titik patah terjadi pada regangan 383,6%.



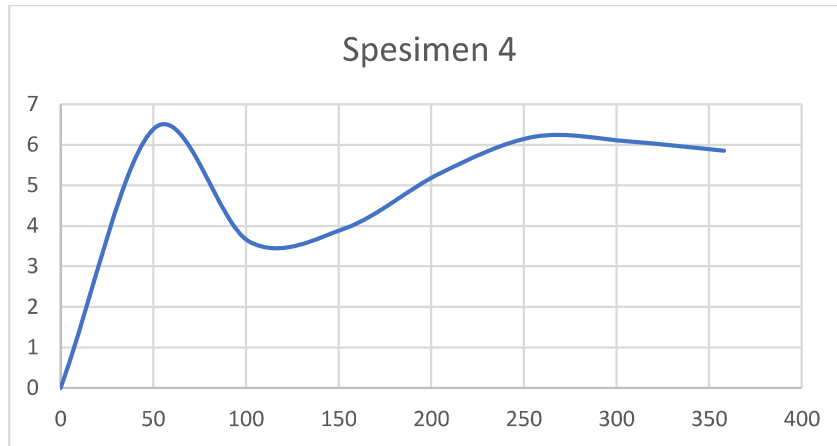
Gambar 4. 32 Grafik Tegangan Hasil Uji Tarik Spesimen 3

Dari gambar diatas dapat diartikan bahwa setiap tegangan yang diberikan pada specimen 3 berpengaruh terhadap pertambahan panjang hingga sampai titik patah. Tegangan tertinggi yang dicapai pada specimen ini mencapai 14 MPa dan regangan maksimal yang diterima 383,6%. Secara visual, titik *yield* diidentifikasi pada 4,40 MPa dan *elongation yield* pada 1,42%.

d) Sampel 4

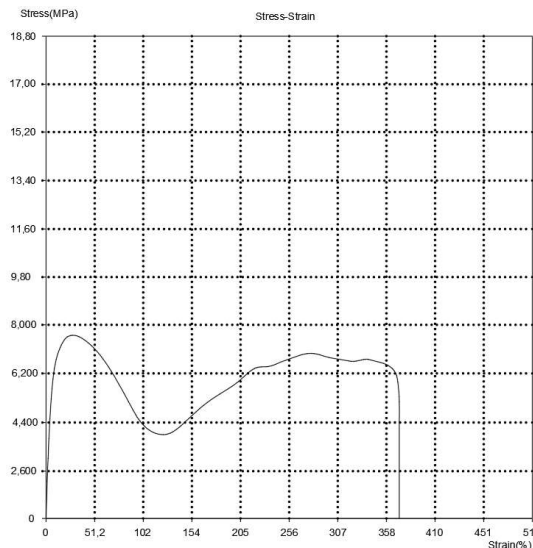
Table 4.8 Nilai Regangan dan Tegangan Spesimen 4

Regangan (%)	Tegangan (MPa)
51,2	6,42
102	3,61
154	3,95
205	5,3
256	6,2
307	6,08
358	5,85



Gambar 4. 33 Grafik Regangan dan Tegangan Dari Hasil Uji Tarik Pada Spesimen 4

Gambar berikut merupakan grafik regangan dan tegangan dari hasil uji tarik pada spesimen 4. Kekuatan tarik tertinggi terjadi pada nilai tegangan 6,98 MPa dan titik patah terjadi pada regangan 358%.



Gambar 4. 34 Grafik Tegangan Hasil Uji Tarik Spesimen 4

Dari gambar diatas dapat diartikan bahwa setiap tegangan yang diberikan pada specimen 4 berpengaruh terhadap penambahan panjang hingga sampai titik patah. Tegangan tertinggi yang dicapai pada specimen ini mencapai 6,9 MPa dan regangan maksimal yang diterima 358%. Secara visual, titik *yield* diidentifikasi pada 2,70 MPa dan *elongation yield* pada 1,42%.

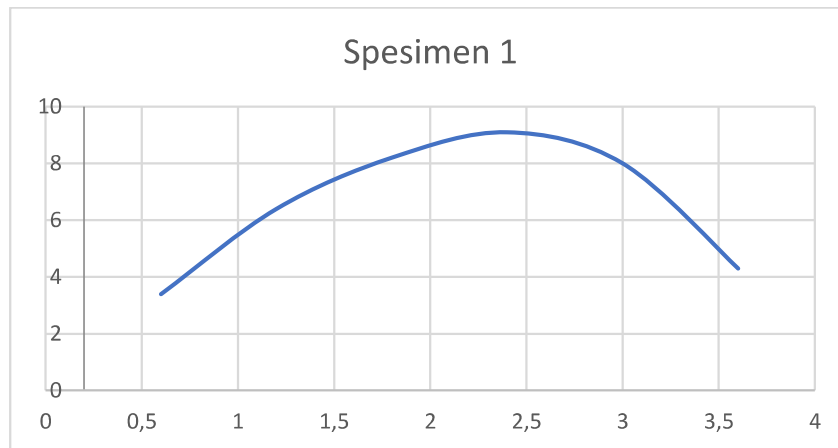
4.4.3 Dilas Dengan Pemanasan

a) Sampel 1

Table 4.9 Nilai Regangan dan Tegangan Spesimen 1

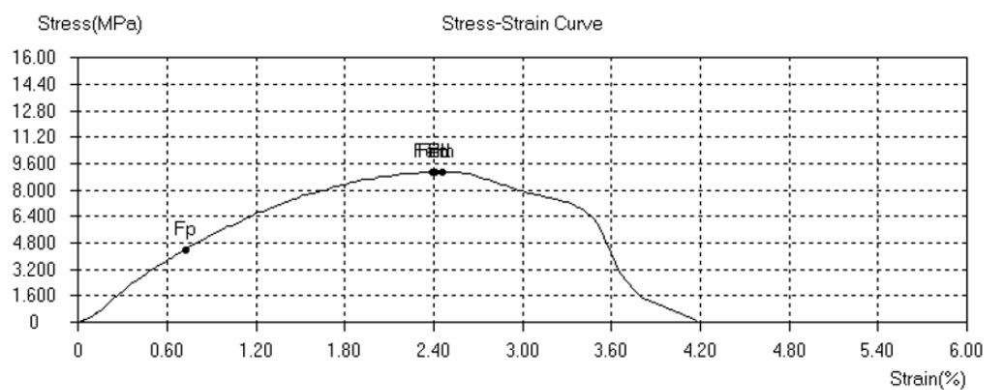
Regangan (%)	Tegangan (MPa)
0,6	3,4

1,2	6,4
1,8	8,2
2,4	9,1
3	8
3,6	4,3



Gambar 4. 35 Grafik Regangan dan Tegangan Dari Hasil Uji Tarik Spesimen 1

Gambar berikut merupakan grafik regangan dan tegangan dari hasil uji tarik pada spesimen 1. Kekuatan tarik tertinggi terjadi pada nilai tegangan 4,1 MPa dan titik patah terjadi pada regangan 8,2%.



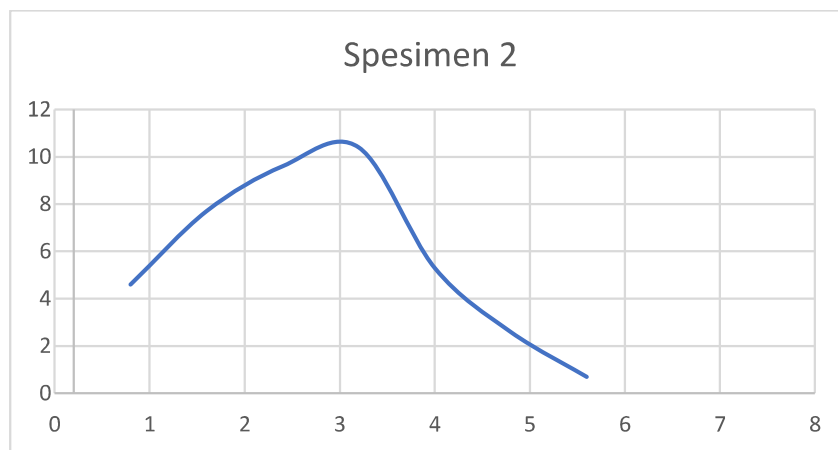
Gambar 4. 36 Grafik Tegangan Hasil Uji Tarik Spesimen 1

Dari gambar diatas dapat diartikan bahwa setiap tegangan yang diberikan pada specimen 1 berpengaruh terhadap pertambahan panjang hingga sampai titik patah. Tegangan tertinggi yang dicapai pada specimen ini mencapai 4,1 MPa dan regangan maksimal yang diterima 8,2%. Secara visual, titik *yield* diidentifikasi pada 4,60 MPa dan *elongation yield* pada 0,7%.

b) Sample 2

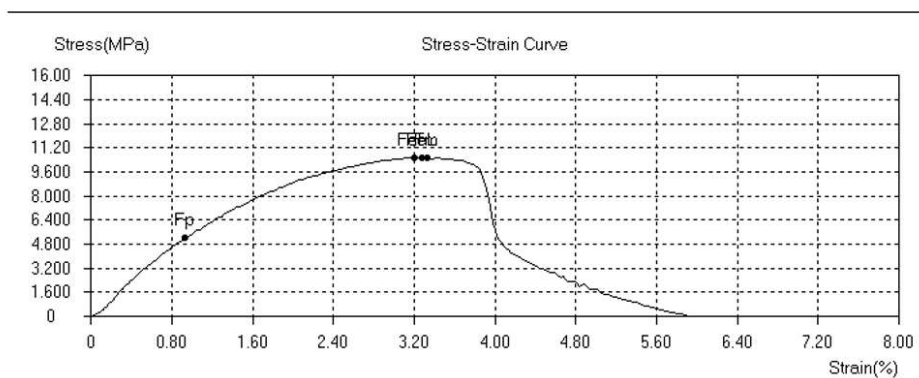
Table 4.10 Nilai Regangan dan Tegangan Spesimen 2

Regangan (%)	Tegangan (MPa)
0,8	4,6
1,6	7,7
2,4	9,6
3,2	10,4
4	5,3
4,8	2,6
5,6	0,7



Gambar 4. 37 Grafik Regangan dan Tegangan Dari Hasil Uji Tarik Pada Spesimen 2

Gambar berikut merupakan grafik regangan dan tegangan dari hasil uji tarik pada spesimen 2. Kekuatan tarik tertinggi terjadi pada nilai tegangan 10,2 MPa dan titik patah terjadi pada regangan 5,9%.



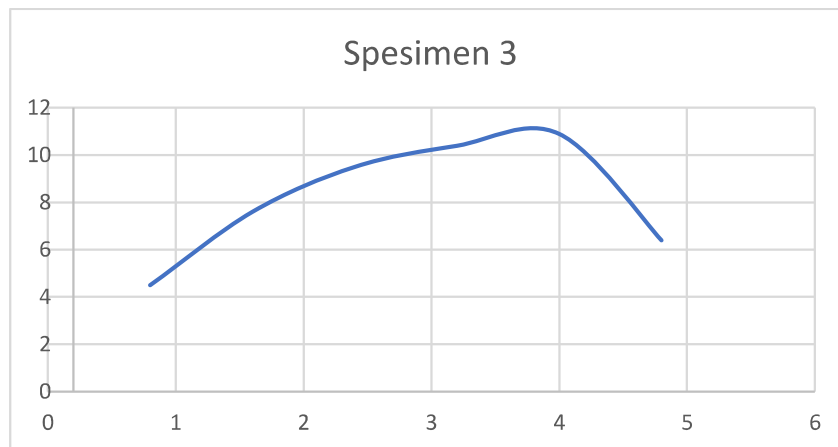
Gambar 4. 38 Grafik Tegangan Hasil Uji Tarik Spesimen 2

Dari gambar diatas dapat diartikan bahwa setiap tegangan yang diberikan pada specimen 2 berpengaruh terhadap pertambahan panjang hingga sampai titik patah. Tegangan tertinggi yang dicapai pada specimen ini mencapai 10,2 MPa dan regangan maksimal yang diterima 5,9 %. Secara visual, titik *yield* diidentifikasi pada 5,20 MPa dan *elongation yield* pada 1%.

c) Sample 3

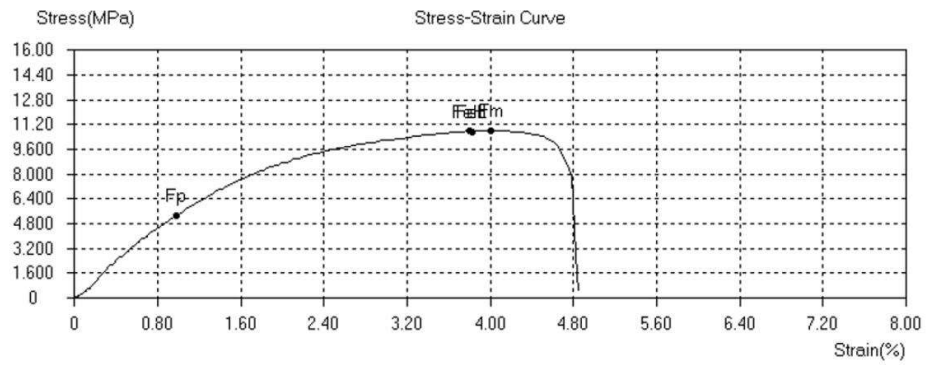
Table 4.11 Nilai Regangan dan Tegangan Spesimen 3

Regangan (%)	Tegangan (MPa)
0,8	4,5
1,6	7,6
2,4	9,5
3,2	10,4
4	10,9
4,8	6,4



Gambar 4. 39 Grafik Regangan dan Tegangan Dari Hasil Uji Tarik Pada Spesimen 3

Gambar berikut merupakan grafik regangan dan tegangan dari hasil uji tarik pada spesimen 3. Kekuatan tarik tertinggi terjadi pada nilai tegangan 10,9 MPa dan titik patah terjadi pada regangan 4,9%.



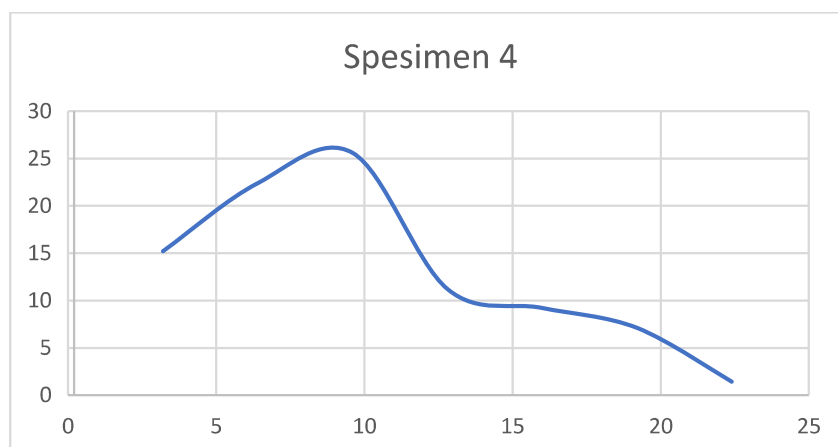
Gambar 4. 40 Grafik Tegangan Hasil Uji Tarik Spesimen 3

Dari gambar diatas dapat diartikan bahwa setiap tegangan yang diberikan pada specimen 3 berpengaruh terhadap penambahan panjang hingga sampai titik patah. Tegangan tertinggi yang dicapai pada specimen ini mencapai 10,9 MPa dan regangan maksimal yang diterima 4,9%. Secara visual, titik *yield* diidentifikasi pada 5,20 MPa dan *elongation yield* pada 1%.

d) Sampel 4

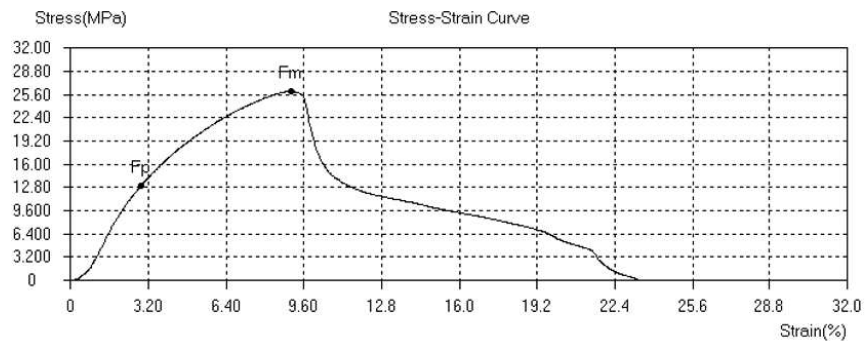
Table 4.12 Nilai Regangan dan Tegangan Spesimen 4

Regangan (%)	Tegangan (MPa)
3,2	15,2
6,4	22,4
9,6	25,6
12,8	11,2
16	9,2
19,2	7,1
22,4	1,4



Gambar 4. 41 Grafik Regangan dan Tegangan Dari Hasil Uji Tarik Pada Spesimen 4

Gambar berikut merupakan grafik regangan dan tegangan dari hasil uji tarik pada spesimen 4. Kekuatan tarik tertinggi terjadi pada nilai tegangan 26,1 MPa dan titik patah terjadi pada regangan 23,2%.



Gambar 4. 42 Grafik Tegangan Hasil Uji Tarik Spesimen 4

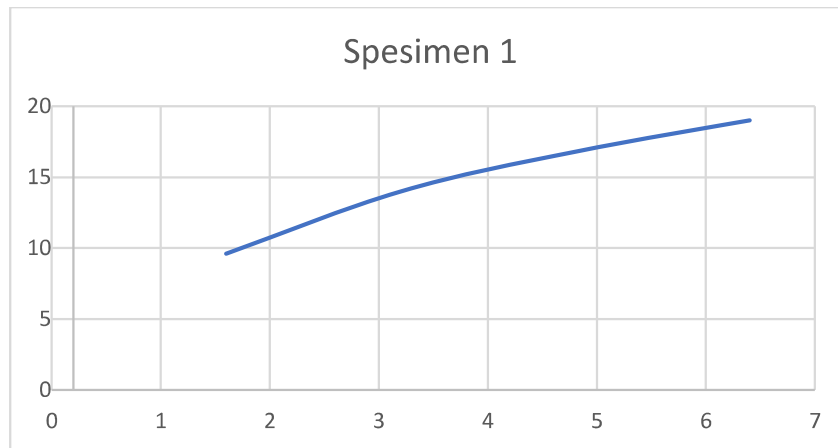
Dari gambar diatas dapat diartikan bahwa setiap tegangan yang diberikan pada spesimen 4 berpengaruh terhadap pertambahan panjang hingga sampai titik patah. Tegangan tertinggi yang dicapai pada spesimen ini mencapai 26,1 MPa dan regangan maksimal yang diterima 23,2%. Secara visual, titik *yield* diidentifikasi pada 4,60 MPa dan *elongation yield* pada 3%.

4.4.4 Dilas Tanpa Pemanasan

a) Sampel 1

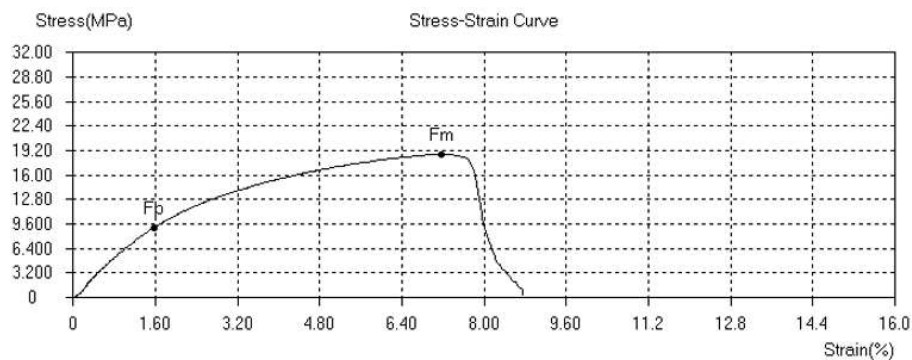
Table 4.13 Nilai Regangan dan Tegangan Spesimen 1

Regangan (%)	Tegangan (MPa)
1,6	9,6
3,2	14
4,8	16,8
6,4	18,6



Gambar 4. 43 Grafik Regangan dan Tegangan Dari Hasil Uji Tarik Pada Spesimen 1

Gambar berikut merupakan grafik regangan dan tegangan dari hasil uji tarik pada spesimen 1. Kekuatan tarik tertinggi terjadi pada nilai tegangan 19 MPa dan titik patah terjadi pada regangan 8,4 %.



Gambar 4. 44 Grafik Tegangan Hasil Uji Tarik Spesimen 1

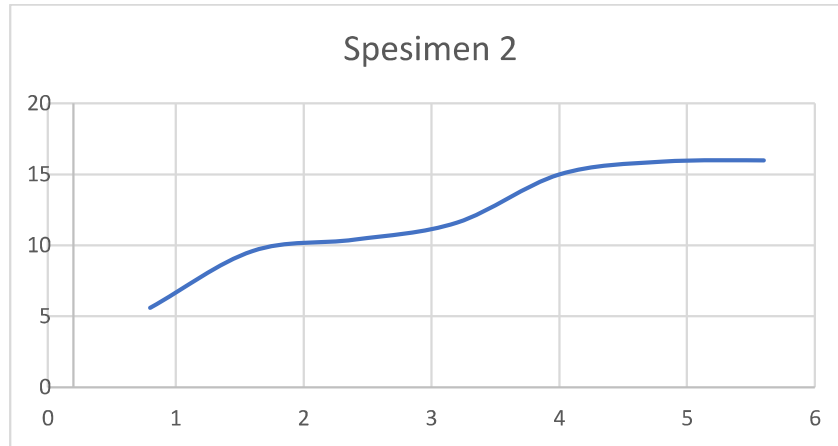
Dari gambar diatas dapat diartikan bahwa setiap tegangan yang diberikan pada specimen 1 berpengaruh terhadap pertambahan panjang hingga sampai titik patah. Tegangan tertinggi yang dicapai pada specimen ini mencapai 19 MPa dan regangan maksimal yang diterima 8,4%. Secara visual, titik *yield* diidentifikasi pada 7,00 MPa dan *elongation yield* pada 1,6%.

b) Sampel 2

Table 4.14 Nilai Regangan dan Tegangan Spesimen 2

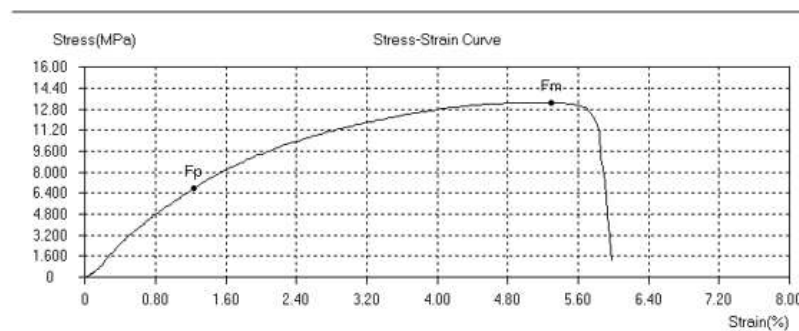
Regangan (%)	Tegangan (MPa)
0,8	5,6
1,6	9,6
2,4	10,4
3,2	11,6

4	15
4,8	15,9
5,6	16



Gambar 4. 45 Grafik Regangan dan Tegangan Dari Hasil Uji Tarik Pada Spesimen 2

Gambar berikut merupakan grafik regangan dan tegangan dari hasil uji tarik pada spesimen 2. Kekuatan tarik tertinggi terjadi pada nilai tegangan 16 MPa dan titik patah terjadi pada regangan 6%.



Gambar 4. 46 Grafik Tegangan Hasil Uji Tarik Spesimen 2

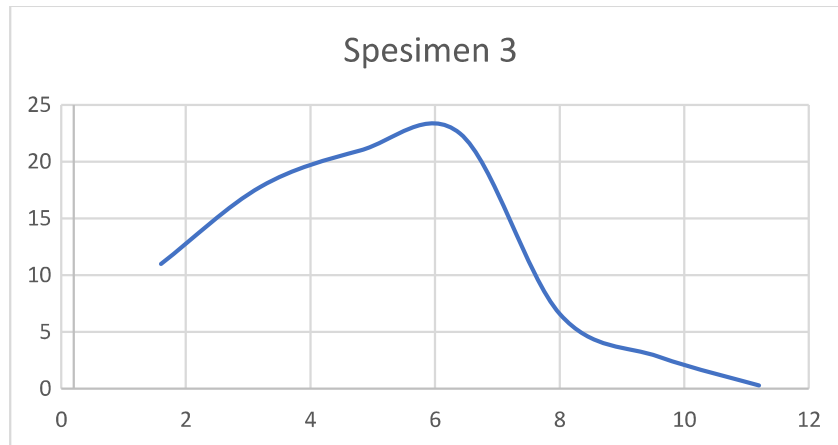
Dari gambar diatas dapat diartikan bahwa setiap tegangan yang diberikan pada specimen 2 berpengaruh terhadap pertambahan panjang hingga sampai titik patah. Tegangan tertinggi yang dicapai pada specimen ini mencapai 16 MPa dan regangan maksimal yang diterima 6%. Secara visual, titik *yield* diidentifikasi pada 6,50 MPa dan *elongation yield* pada 1,3%.

c) Sample 3

Table 4.15 Nilai Regangan dan Tegangan Spesimen 3

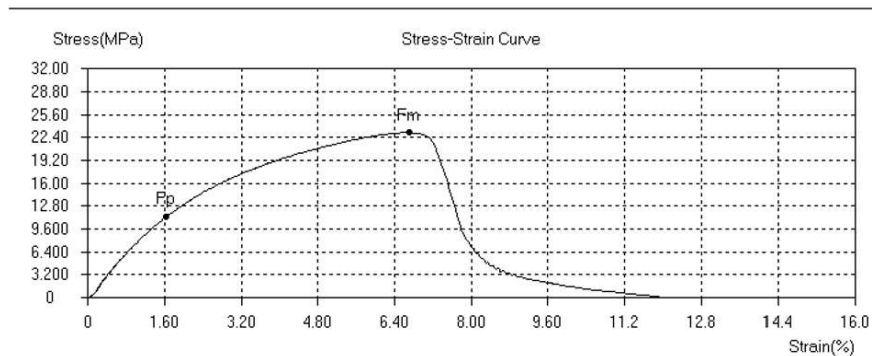
Regangan (%)	Tegangan (MPa)
1,6	11
3,2	17,8

4,8	21
6,4	22,5
8	6,6
9,6	2,8
11,2	0,3



Gambar 4. 47 Grafik Tegangan Dari Hasil Uji Tarik Pada Spesimen 3

Gambar berikut merupakan grafik regangan dan tegangan dari hasil uji tarik pada spesimen 3. Kekuatan tarik tertinggi terjadi pada nilai tegangan 22,5 MPa dan titik patah terjadi pada regangan 11,8%.



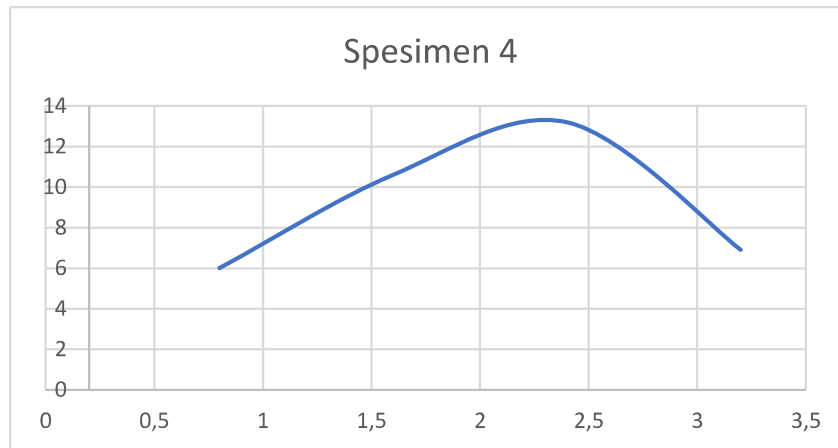
Gambar 4. 48 Grafik Tegangan Hasil Uji Tarik Spesimen 3

Dari gambar diatas dapat diartikan bahwa setiap tegangan yang diberikan pada specimen 3 berpengaruh terhadap pertambahan panjang hingga sampai titik patah. Tegangan tertinggi yang dicapai pada specimen ini mencapai 22,5 MPa dan regangan maksimal yang diterima 11,8%. Secara visual, titik *yield* diidentifikasi pada 11.2 MPa dan *elongation yield* pada 1,6%.

d) Sampel 4

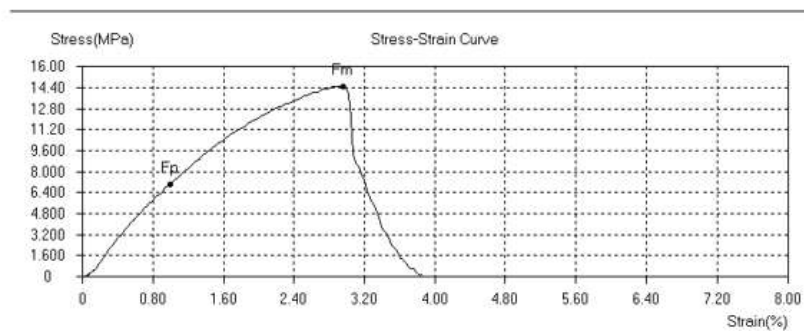
Table 4.16 Nilai Regangan dan Tegangan Spesimen 4

Regangan (%)	Tegangan (MPa)
0,8	6
1,6	10,6
2,4	13,2
3,2	6,9



Gambar 4. 49 Grafik Tegangan Dari Hasil Uji Tarik Pada Spesimen 4

Gambar berikut merupakan grafik regangan dan tegangan dari hasil uji tarik pada spesimen 4. Kekuatan tarik tertinggi terjadi pada nilai tegangan 14,4 MPa dan titik patah terjadi pada regangan 3,8%.



Gambar 4. 50 Grafik Tegangan Hasil Uji Tarik Spesimen 4

Dari gambar diatas dapat diartikan bahwa setiap tegangan yang diberikan pada specimen 4 berpengaruh terhadap penambahan panjang hingga sampai titik patah. Tegangan tertinggi yang dicapai pada specimen ini mencapai 14,4 MPa dan regangan maksimal yang diterima 3,8%. Secara visual, titik *yield* diidentifikasi pada 7,20 MPa dan *elongation yield* pada 1%.

4.5 Data Uji Tarik

4.5.1 Tanpa Pengelasan dan Tanpa Pemanasan

Table 4.17 Data Nilai Uji Tarik Spesimen Tanpa Pengelasan dan Tanpa Pengelasan

No.	Sampel	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Regangan (%)	Kuat Tarik (MPa)
1.	1	165	13	10	473,8	22,9
2.	2	165	13	10	345,4	24,5
3.	3	165	13	10	240	27
4.	3	165	13	10	110	19,65
Rata-rata (Σ)					292,3	23,5

4.5.2 Tanpa Pengelasan dengan Pemanasan

Table 4.18 Data Nilai Uji Tarik Spesimen Tanpa Pengelasan Dengan Pengelasan

No.	Sampel	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Regangan (%)	Kuat Tarik (MPa)
1.	1	165	13	10	448,2	9,2
2.	2	165	13	10	1020	10,4
3.	3	165	13	10	383,6	14
4.	3	165	13	10	358	6,9
Rata-rata (Σ)					552,45	10,15

4.5.3 Dilas dengan Pemanasan

Table 4.19 Data Nilai Uji Tarik Spesimen Dilas Tanpa Pemanasan

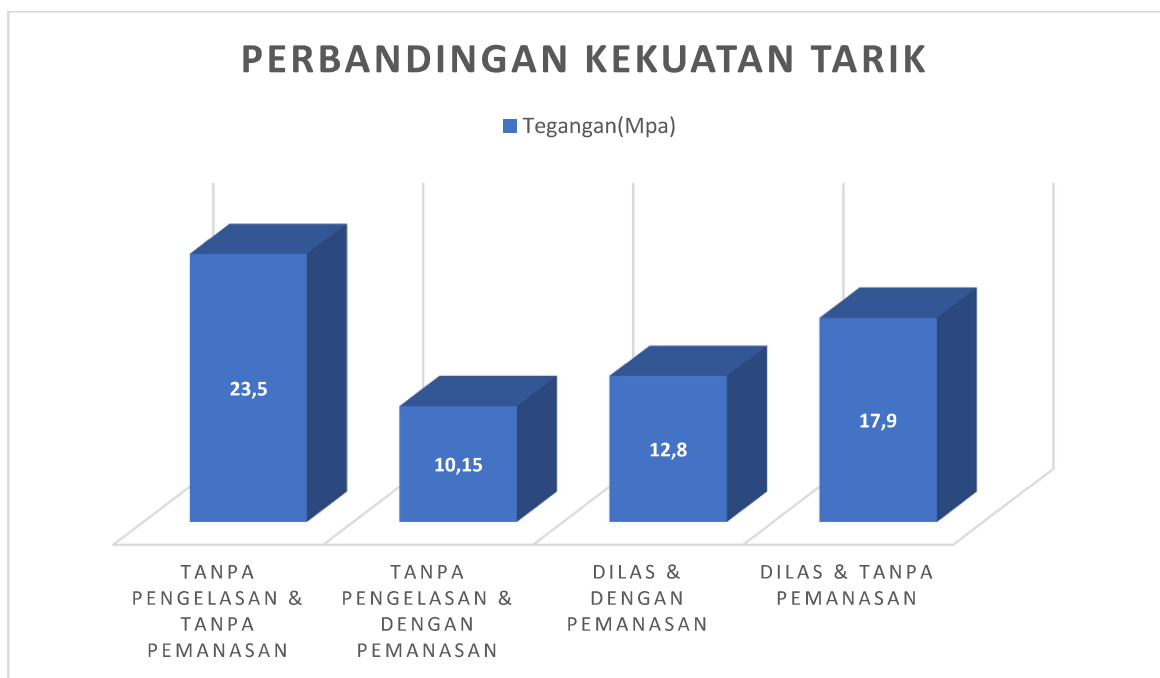
No.	Sampel	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Regangan (%)	Kuat Tarik (MPa)
1.	1	165	13	10	8,2	4,1
2.	2	165	13	10	5,9	10,2
3.	3	165	13	10	4,9	10,9
4.	3	165	13	10	23,2	26,1
Rata-rata (Σ)					10,5	12,8

4.5.4 Dilas tanpa Pemanasan

Table 4.20 Data Nilai Uji Tarik Spesimen Dilas Dengan Pemanasan

No.	Sampel	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Regangan (%)	Kuat Tarik (MPa)
1.	1	165	13	10	8,4	19
2.	2	165	13	10	6	16
3.	3	165	13	10	11,8	22,5
4.	3	165	13	10	3,8	14,4
Rata-rata (Σ)					7,5	17,9

Berdasarkan dari data dari hasil uji tarik yang telah disajikan pada tabel diatas, maka menghasilkan grafik untuk menentukan perbandingan kekuatan tarik dari variable uji.



Gambar 4. 51 Grafik Perbandingan Kekuatan Tarik

Table 4.21 Nilai *Tensile Elongation at Yield* (ϵ_y)

Variable Perlakuan	S-1	S-2	S-3	S-4	Rata – rata (%)
Tanpa Pengelasan dan Tanpa Pemanasan	1,6	1,42	3,2	1,6	1,95
Tanpa Pengelasan dan Dengan Pemanasan	6,4	6	1,42	1,42	3,81
Dengan Pengelasan dan Tanpa Pemanasan	1,6	1,3	1,6	1	1,37
Dengan Pengelasan dan Dengan Pemanasan	0,7	1	1	3	1,42

Table 4.22 Nilai *Tensile Yield Stress* (σ_y)

Variable Perlakuan	S-1	S-2	S-3	S-4	Rata – rata (MPa)
Tanpa Pengelasan dan Tanpa Pemanasan	6,00	12,80	9,60	8,00	9,1
Tanpa Pengelasan dan Dengan Pemanasan	4,90	4,40	4,20	2,70	4,05
Dengan Pengelasan dan Tanpa Pemanasan	7,00	6,50	11,20	7,20	7,97
Dengan Pengelasan dan Dengan Pemanasan	4,60	5,20	5,20	4,60	4,9

4.6 Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas merupakan parameter yang mengindikasikan kapabilitas suatu material untuk berdeformasi secara elastis ketika dikenai gaya eksternal pada spesimen tersebut. Representasi data ini diperoleh melalui analisis perbandingan hubungan antara tegangan dan regangan yang dihasilkan pada suatu material uji.

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

E = Modulus Elastisitas

σ = Tegangan

e = Regangan

4.6.1 Tanpa Pengelasan dan Tanpa Pemanasan

Table 4.23 Nilai Spesimen Tanpa Pengelasan dan Tanpa Pemanasan

Spesimen	Tegangan (MPa)	Regangan (%)	Modulus elastisitas (MPa)
1	6	1,4	428,5
2	11,2	4,2	400
3	12,8	4,2	304
4	6	1,42	422

4.6.2 Tanpa Pengelasan dengan Pemanasan

Table 4.24 Nilai Spesimen Tanpa Pengelasan Dengan Pemanasan

Spesimen	Tegangan (MPa)	Regangan (%)	Modulus elastisitas (MPa)
1	3	1	300
2	4,2	0,95	466
3	3	1	300
4	3	0,7	341,4

4.6.3 Dilas dengan Pemanasan

Table 4.25 Nilai Spesimen Dilas Tanpa Pengelasan

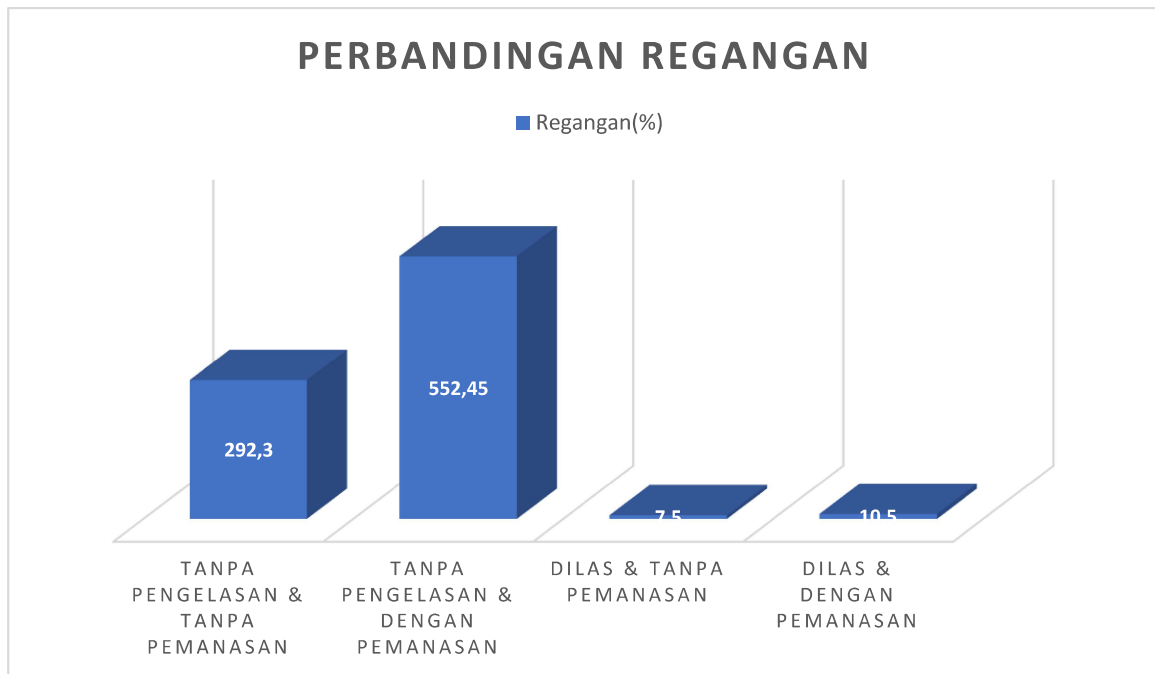
Spesimen	Tegangan (MPa)	Regangan (%)	Modulus elastisitas (MPa)
1	4,6	1	460
2	4,9	1,1	445,4
3	5,1	1,2	425
4	12,8	3,2	400

4.6.4 Dilas tanpa Pemanasan

Table 4.26 Nilai Spesimen Dilas Dengan Pemanasan

Spesimen	Tegangan (MPa)	Regangan (%)	Modulus elastisitas (MPa)
1	9,6	1,8	533,3

2	6,5	1,3	500
3	7,5	1,4	535,7
4	7	3,8	538,4



Gambar 4. 52 Grafik Perbandingan Regangan

4.7 Analisis Hasil Perhitungan Modulus Elastisitas

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, diperoleh variasi nilai modulus elastisitas pada setiap kondisi perlakuan spesimen, yaitu tanpa pengelasan tanpa pemanasan, tanpa pengelasan dengan pemanasan, dilas dengan pemanasan, serta dilas tanpa pemanasan.

Pada kondisi tanpa pengelasan dan tanpa pemanasan, nilai modulus elastisitas berkisar antara 304 MPa hingga 428,5 MPa dengan rata-rata sebesar 388,6 MPa. Nilai ini menunjukkan bahwa material memiliki tingkat kekakuan yang relatif sedang, namun masih menunjukkan variasi yang cukup signifikan antar spesimen. Variasi ini dapat disebabkan oleh ketidakhomogenan struktur material serta distribusi tegangan yang tidak merata selama pengujian.

Selanjutnya, pada kondisi tanpa pengelasan dengan pemanasan, diperoleh nilai modulus elastisitas berkisar antara 300 MPa hingga 460 MPa dengan rata-rata sebesar 350,4 MPa. Jika dibandingkan dengan kondisi tanpa pemanasan, terjadi kecenderungan penurunan nilai modulus elastisitas. Hal ini mengindikasikan bahwa proses pemanasan menyebabkan meningkatnya mobilitas rantai polimer pada material HDPE, sehingga ikatan antar molekul menjadi lebih lemah dan material menjadi lebih mudah mengalami deformasi.

Pada kondisi dilas dengan pemanasan, nilai modulus elastisitas berada pada rentang 400 MPa hingga 460 MPa dengan rata-rata sebesar 432,6 MPa. Peningkatan nilai modulus dibandingkan spesimen tanpa pengelasan menunjukkan bahwa proses pengelasan memberikan

kontribusi terhadap peningkatan kekakuan material. Hal ini disebabkan oleh terjadinya proses penyatuan (*fusion bonding*) antar permukaan material yang meningkatkan kontinuitas struktur dan kemampuan dalam menahan beban.

Sementara itu, pada kondisi dilas tanpa pemanasan, diperoleh nilai modulus elastisitas tertinggi, yaitu berkisar antara 500 MPa hingga 538,4 MPa dengan rata-rata sebesar 526,9 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi proses pengelasan tanpa perlakuan pemanasan tambahan menghasilkan struktur material yang paling kaku. Tingginya nilai modulus elastisitas pada kondisi ini mengindikasikan bahwa proses pengelasan mampu meningkatkan integritas struktur material tanpa menyebabkan degradasi sifat mekanik akibat pemanasan berlebih.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa proses pengelasan memiliki pengaruh signifikan dalam meningkatkan modulus elastisitas material HDPE, sedangkan pemanasan cenderung menurunkan nilai kekakuan material. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa perlakuan terbaik untuk memperoleh sifat mekanik yang optimal adalah melalui proses pengelasan tanpa pemanasan tambahan.

Implikasi dari hasil ini terhadap aplikasi konstruksi kapal adalah bahwa material HDPE yang telah dilas tanpa pemanasan memiliki potensi yang lebih baik untuk digunakan pada bagian struktur yang membutuhkan kekakuan tinggi, seperti rangka atau badan utama kapal. Sementara itu, kondisi material dengan modulus elastisitas yang lebih rendah dapat dimanfaatkan pada bagian yang memerlukan fleksibilitas tertentu.

Dengan demikian, pengendalian proses manufaktur, khususnya pada aspek pengelasan dan pemanasan, menjadi faktor penting dalam menentukan performa mekanik material HDPE sebagai alternatif pengganti kayu dalam konstruksi kapal.

4.8 Analisis Rata-rata Hasil Data Uji Tarik

Banyak data uji mekanik HDPE diperoleh melalui uji tarik standar ASTM D638 (plastik). Menurut data tipikal industri, kekuatan tarik putus HDPE murni berada di kisaran ~32 MPa dengan modulus elastisitas ~1,25 GPa. Dalam uji tarik tersebut, HDPE menunjukkan regangan putus sangat besar (~150%) dan ketangguhan yang tinggi. Sebagai pembanding, standar ASTM D638 mensyaratkan spesimen berbentuk dogbone dengan ketebalan ~3–4 mm untuk material termoplastik.

Hasil uji laboratorium pada HDPE daur ulang (lembaran drum biru) sebagai bahan kapal pompong menunjukkan kekuatan tarik yang baik. Misalnya, Ridwan et al. (2022) melaporkan bahwa sambungan las dua lapis HDPE drum menghasilkan kekuatan tarik sekitar 17,1 MPa, sedangkan uji tekan (*compressive strength*) pada laminasi HDPE tersebut rata-rata mencapai 23,36 MPa. Nilai ini jauh di atas beban nominal yang dialami lambung kapal (dalam kasus jukung/cadik, tekanan hidrostatis hanya ~0,0039 MPa). Sementara itu, literatur lain menyebutkan HDPE memiliki nilai modulus elastisitas tarik sekitar 0,8–1,2 GPa dan kekuatan luluh (*yield*) yang lebih rendah daripada logam tetapi cukup untuk aplikasi struktural ringan. Nilai-nilai uji mekanik HDPE ini akan menjadi dasar perhitungan dimensi dan ketebalan pelat pada perancangan perahu.

Dengan seluruh referensi dan sesuai dengan batasan masalah pada penelitian hanya menggunakan rules yang digunakan oleh Biro Klasifikasi Indonesia. Dengan standar :

Table 4.27 Tabel Rules BKI

Property	Properties of HDPE	Unit	Test Method
Density	0,946 to 0,972	g/cm ³	ASTM D792-20
Melt Mass Flow Rate	0,030 to 10 (190 °C/2,16 kg)	g/10 min	ISO 1133-1:2011
Tensile Yield Stress	min 17	N/mm ²	ASTM D638-14
Ultimate Tensile Stress	min 24	N/mm ²	ASTM D638-14
Tensile Elongation at Yield	1,0 to 27	%	ASTM D638-14
Tensile Elongation at Break	10 to 1500	%	ASTM D638-14

4.8.1 Spesimen Tanpa Pengelasan dan Tanpa Pemanasan

Spesimen kontrol merupakan acuan dasar untuk mengevaluasi pengaruh perlakuan panas dan pengelasan. Dari pengujian empat spesimen diperoleh nilai UTS masing-masing 22,9 MPa; 24,5 MPa; 27,0 MPa; dan 19,65 MPa, sehingga rata-rata UTS sebesar 23,51 MPa. Nilai rata-rata ini melampaui batas minimum BKI sebesar 20 MPa, dengan margin aman +17,6%. Kekuatan tarik tertinggi dicapai oleh spesimen ke-3 (27,0 MPa) dan terendah oleh spesimen ke-4 (19,65 MPa). Spesimen ke-4 tidak memenuhi persyaratan BKI secara individual, yang mengindikasikan adanya variasi mutu pada proses pemotongan atau keseragaman material plat HDPE.

Nilai yield stress rata-rata sebesar 9,1 MPa berada di bawah batas minimum BKI sebesar 10 MPa. Kondisi ini menunjukkan bahwa material kontrol belum cukup kaku dalam fase elastis awal untuk memenuhi persyaratan konstruksi lambung secara penuh. Di sisi lain, regangan putus rata-rata mencapai 292,3% — jauh di atas batas BKI 50% — yang menandakan sifat ulet (ductile) yang sangat baik dari material HDPE tanpa perlakuan tambahan.

a. *Tensile Yield Stress* (σ_y):

$$\sigma_y = \frac{6 + 12,8 + 9,6 + 8}{4}$$

$$\sigma_y = 9,1 \text{ MPa (Tidak Memenuhi Standar BKI)}$$

b. *Ultimate Tensile Stress* (UTS):

$$UTS = \frac{22,9 + 24,5 + 27 + 19,65}{4}$$

$$UTS = 23,5 \text{ MPa (Memenuhi Standar BKI)}$$

c. *Tensile Elongation at Yield* (ϵ_y):

$$\epsilon_y = \frac{1,6 + 1,42 + 3,2 + 1,6}{4}$$

$$\epsilon_y = 1,95\% \text{ (Memenuhi Standar BKI)}$$

d. *Tensile Elongation at Break* (ϵ_b):

$$\varepsilon_b = \frac{473,8 + 345,4 + 240 + 110}{4}$$

$$\varepsilon_b = 292,3\% \text{ (Memenuhi Standar BKI)}$$

Karakteristik sifat mekanik spesimen kontrol mencerminkan perilaku material HDPE murni dalam kondisi standar. Kurva tegangan-regangan menunjukkan pola elastis-plastis tipikal termoplastik semi-kristalin: terjadi kenaikan tegangan linear pada fase elastis, diikuti oleh penurunan tajam (necking) pasca yield point, kemudian diikuti oleh plateau tegangan yang relatif rendah (3–4 MPa) pada deformasi plastis yang sangat besar. Fenomena cold drawing ini merupakan karakteristik khas HDPE di mana rantai-rantai polimer berorientasi mengikuti arah tarikan. Fenomena ini bersifat menguntungkan dalam konteks aplikasi lambung perahu, karena material dapat menyerap energi benturan secara signifikan tanpa terjadi kegagalan getas.

4.8.2 Spesimen Tanpa Pengelasan dan Dengan Pemanasan

Perlakuan panas pada suhu 120–140°C menggunakan media oli panas berdampak signifikan terhadap sifat mekanik material. Nilai UTS rata-rata turun menjadi 10,15 MPa (dari 9,2; 10,4; 14,0; dan 6,9 MPa), yang berarti terjadi penurunan kekuatan tarik sebesar 56,8% dibandingkan spesimen kontrol. Hasil ini tidak memenuhi persyaratan BKI minimum 20 MPa, dengan defisit sebesar -49,3%. Penurunan UTS yang drastis ini disebabkan oleh perubahan struktur mikro material: pemanasan pada kisaran 120–140°C mendekati titik softening HDPE sehingga terjadi relaksasi rantai polimer, peningkatan mobilitas molekul, dan berkurangnya derajat kristalinitas lokal.

Nilai yield stress turun menjadi 4,05 MPa rata-rata, yakni penurunan 55,5% terhadap kontrol dan jauh di bawah standar BKI. Namun elongasi putus rata-rata meningkat drastis menjadi 552,5% — bahkan satu spesimen (S-2) mencapai 1020% dan tidak putus hingga batas maksimal mesin UTM. Peningkatan elongasi ini merupakan konsekuensi langsung dari menurunnya kristalinitas: material yang lebih amorf memiliki kapasitas deformasi lebih besar, namun dengan kekuatan yang lebih rendah.

- a. *Tensile Yield Stress* (σ_y):

$$\sigma_y = \frac{4,9 + 4,4 + 4,2 + 2,7}{4}$$

$$\sigma_y = 4,05 \text{ MPa (Tidak Memenuhi Standar BKI)}$$

- b. *Ultimate Tensile Stress* (UTS):

$$UTS = \frac{9,2 + 10,4 + 14 + 6,9}{4}$$

$$UTS = 10,15 \text{ (Tidak Memenuhi Standar BKI)}$$

- c. *Tensile Elongation at Yield* (ε_y):

$$\varepsilon_y = \frac{6,4 + 6 + 1,42 + 1,42}{4}$$

$$\varepsilon_y = 3,81\% \text{ (Memenuhi Standar BKI)}$$

- d. *Tensile Elongation at Break* (ε_b):

$$\varepsilon b = \frac{448,2 + 1020 + 383,6 + 358}{4}$$

$$\varepsilon b = 552,5\% \text{ (Memenuhi Standar BKI)}$$

Ditinjau dari kebutuhan struktural perahu nelayan, variasi ini tidak direkomendasikan untuk digunakan pada elemen struktural utama (lambung, lunas, gading) karena tidak memenuhi standar UTS dan yield stress BKI. Variasi ini hanya dapat dipertimbangkan untuk aplikasi non-struktural yang memerlukan fleksibilitas tinggi, seperti lapisan pelindung atau seal.

4.8.3 Spesimen Dengan Pengelasan dan Tanpa Pemanasan

Variasi ketiga menerapkan proses pengelasan hot air welding langsung pada material HDPE tanpa perlakuan panas awal. Nilai UTS rata-rata sebesar 17,98 MPa (dari 19,0; 16,0; 22,5; dan 14,4 MPa) berada di bawah standar BKI (20 MPa) dengan defisit -10,1%. Meskipun tidak memenuhi standar secara rata-rata, spesimen S-3 secara individual mencapai 22,5 MPa (memenuhi) dan S-1 mencapai 19,0 MPa (hampir memenuhi). Variasi antar spesimen yang cukup besar ($SD \approx 3,3$ MPa) mengindikasikan pengaruh signifikan dari kualitas eksekusi pengelasan terhadap hasil uji.

Nilai yield stress rata-rata sebesar 7,98 MPa tidak memenuhi standar BKI 10 MPa. Namun patut diperhatikan bahwa S-3 mencapai $\sigma_y = 11,2$ MPa yang melampaui standar. Pola ini menunjukkan bahwa dengan teknik pengelasan yang konsisten dan terkontrol, sambungan HDPE berpotensi mencapai yield stress yang memadai. Regangan putus rata-rata sebesar 7,50% tidak memenuhi batas minimum BKI ($\geq 50\%$), sebagai konsekuensi dari sambungan las yang bersifat lebih getas: konsentrasi tegangan pada zona fusi las menyebabkan inisiasi retak dini sehingga material putus pada regangan yang jauh lebih rendah.

a. *Tensile Yield Stress*(σ_y):

$$\sigma_y = \frac{7 + 6,5 + 11,2 + 7,2}{4}$$

$$\sigma_y = 7,97 \text{ MPa}$$

b. *Ultimate Tensile Stress: (UTM)*:

$$UTS = \frac{19 + 16 + 22,5 + 14,4}{4}$$

$$UTS = 17,9 \text{ MPa}$$

c. *Tensile Elongation at Yield* (ε_y):

$$\varepsilon_y = \frac{1,6 + 1,3 + 1,6 + 1}{4}$$

$$\varepsilon_y = 1,37\% \text{ (Memenuhi Standar BKI)}$$

d. *Tensile Elongation at Break* (ε_b):

$$\varepsilon_b = \frac{8,4 + 6 + 11,8 + 3,8}{4}$$

$$\varepsilon_b = 7,5\% \text{ (Tidak Memenuhi Standar BKI)}$$

Nilai modulus elastisitas rata-rata 526,9 MPa merupakan yang tertinggi di antara seluruh variasi, menunjukkan bahwa pengelasan tanpa pemanasan menghasilkan material yang paling kaku akibat proses fusi thermal dalam zona las yang menciptakan kontinuitas struktural. Namun kekakuan yang tinggi ini beriringan dengan elongasi putus yang rendah, mencerminkan perilaku semi-getas pada zona sambungan.

4.8.4 Spesimen Dengan Pengelasan dan Dengan Pemanasan

Variasi keempat menerapkan kombinasi perlakuan panas (120–140°C) sebelum proses pengelasan. Nilai UTS rata-rata sebesar 12,83 MPa (dari 4,1; 10,2; 10,9; dan 26,1 MPa) tidak memenuhi standar BKI, dengan defisit -35,9% terhadap nilai minimum 20 MPa. Rentang UTS antar spesimen sangat lebar (4,1 hingga 26,1 MPa), dengan standar deviasi $\approx 8,6$ MPa yang merupakan yang tertinggi di antara seluruh variasi. Hal ini mengindikasikan ketidakstabilan proses yang tinggi ketika kombinasi perlakuan panas dan pengelasan diterapkan secara bersamaan.

a. *Tensile Yield Stress* (σ_y):

$$\sigma_y = \frac{4,6 + 5,2 + 5,2 + 4,6}{4}$$

$$\sigma_y = 4,9 \text{ MPa (Tidak Memenuhi Standar BKI)}$$

b. *Ultimate Tensile Stress* (UTS):

$$UTS = \frac{4,1 + 10,2 + 10,9 + 26,1}{4}$$

$$UTS = 12,8 \text{ MPa (Tidak Memenuhi Standar BKI)}$$

c. *Tensile Elongation at Yield* (ϵ_y):

$$\epsilon_y = \frac{0,7 + 1 + 1 + 3}{4}$$

$$\epsilon_y = 1,42 \% \text{ (Memenuhi Standar BKI)}$$

d. *Tensile Elongation at Break* (ϵ_b):

$$\epsilon_b = \frac{8,2 + 5,9 + 4,9 + 23,2}{4}$$

$$\epsilon_b = 10,5 \text{ (Memenuhi Standar BKI)}$$

Dari perspektif sifat material, variasi ini menghasilkan karakteristik yang paling tidak konsisten dan tidak memenuhi standar struktural. Kombinasi dua proses termal berturut-turut mengakibatkan akumulasi degradasi rantai polimer, ketidakseragaman zona fusi, dan potensi void atau cacat internal dalam lasan. Meskipun demikian, spesimen yang berhasil las dengan baik (S-4) menunjukkan bahwa secara prinsip material ini masih mampu mencapai kekuatan tinggi jika parameter proses dikendalikan dengan ketat.

4.9 Analisis Komparatif Antar Variasi

Perbandingan komprehensif keempat variasi disajikan pada Tabel 4.21 berikut, mencakup nilai rata-rata seluruh parameter mekanik beserta status pemenuhan standar BKI dan rekomendasi aplikasinya

Table 4.28 Perbandingan Komperhensif Spesimen

Variasi	UTS (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	ϵ_b (%)	E (MPa)	BKI UTS	Rekomendasi
Tanpa Las, Tanpa Panas (Kontrol)	23,51	9,10	1,96	292,3	388,6	✓	Elemen Non-Sambungan
Tanpa Las, Dengan Panas	10,15	4,05	3,81	552,5	351,9	✗	Non-struktural
Dengan Las, Tanpa Panas	17,98	7,98	1,38	7,50	526,9	✗	Potensi Struktural*
Dengan Las, Dengan Panas	12,83	4,90	1,43	10,55	432,6	✗	Tidak Direkomendasikan

Dari perbandingan tersebut, beberapa temuan kunci dapat diidentifikasi. Pertama, spesimen kontrol merupakan satu-satunya variasi yang memenuhi standar UTS BKI (23,51 MPa vs. batas 20 MPa), menegaskan bahwa material HDPE tanpa perlakuan tambahan sudah memiliki potensi dasar yang memadai untuk aplikasi struktural perahu nelayan. Kedua, perlakuan panas secara signifikan menurunkan UTS (-56,8%) dan modulus elastisitas (-9,4%) namun meningkatkan elongasi (+88,8%) — trade-off antara kekuatan dan keuletan yang khas pada perubahan kristalinitas HDPE. Ketiga, pengelasan tanpa pemanasan menghasilkan nilai modulus elastisitas tertinggi (526,9 MPa), namun elongasi putus yang sangat rendah (7,50%) mengindikasikan pengurangan keuletan yang signifikan pada zona sambungan. Keempat, kombinasi pemanasan dan pengelasan tidak memberikan sinergi positif; sebaliknya terjadi penurunan performa di semua parameter kekuatan.

4.10 Analisis Karakteristik Sifat Material HDPE terhadap Standar BKI

Analisis karakteristik sifat material dilakukan dengan membandingkan profil mekanik HDPE hasil pengujian terhadap persyaratan struktural BKI serta kebutuhan operasional perahu nelayan. Modulus elastisitas yang diperoleh dari seluruh variasi berkisar antara 300–539 MPa, yang dapat diklasifikasikan sebagai material dengan kekakuan rendah-menengah. Nilai ini jauh di bawah kayu meranti ($E \approx 12.000$ MPa) dan baja ($E \approx 200.000$ MPa), namun hal ini dikompensasi oleh massa jenis yang rendah (± 940 kg/m³), sehingga rasio kekakuan-per-berat (specific stiffness) HDPE masih kompetitif untuk aplikasi perahu nelayan skala kecil.

Untuk mengevaluasi kecukupan ketebalan pelat HDPE, digunakan pendekatan teori pelat tipis. Tekanan hidrostatik pada lambung perahu pada draft maksimum $T = 0,28$ m dihitung sebagai: $p = \rho \times g \times T = 1.025 \times 9,81 \times 0,28 = 2.815$ Pa $\approx 2,82$ kPa. Dengan menggunakan nilai UTS terbaik (23,51 MPa dari spesimen kontrol) dan safety factor $SF = 3,0$ (disarankan BKI

untuk material termoplastik), tegangan izin adalah $\sigma_{izin} = 23,51/3,0 = 7,84$ MPa. Hasil perhitungan teoritis memberikan ketebalan pelat minimum $t_{min} \approx 4,1$ mm. Dengan mempertimbangkan faktor ketidakpastian proses fabrikasi dan variasi beban dinamis akibat gelombang, ketebalan pelat minimum yang direkomendasikan adalah 8 mm. Plat HDPE yang digunakan dalam penelitian ini (tebal 10 mm) telah melampaui nilai minimum ini.

4.11 Ketahanan HDPE terhadap Tekanan Air dan Analisa Perilaku Dinamis

HDPE terbukti tahan terhadap kondisi perairan dan beban dinamis di laut. Sifat tahan air HDPE sangat baik absorpsi airnya hanya $\pm 0,02\%$ sehingga bahan ini tidak mengalami penggelembungan atau degradasi akibat kelembapan. Lapisan HDPE tidak mudah karatan, meminimalkan korosi bila terkena air laut. Selain itu, lapisan permukaan yang halus membuat pertumbuhan organisme laut (biofouling) sangat terbatas dibanding kayu atau logam. Sebagai contoh, Ridwan et al. (2022) menghitung bahwa tekanan hidrostatik maksimum pada lambung jukung/pompong standar hanya sekitar 3,92 kPa (0,0039 MPa). Uji tekan pada laminasi HDPE menunjukkan kekuatan tekan rata-rata 23,36 MPa, sehingga HDPE memiliki faktor keamanan yang sangat tinggi terhadap beban air statis.

Dalam operasional di laut, beban dinamis (ombak, arus, hantaman) memerlukan material dengan ketangguhan tinggi. HDPE memiliki keuletan (toughness) luar biasa mampu menyerap energi benturan tanpa retak karena regangan lelehnya besar. Material ini juga memiliki kemampuan tahan retak yang baik; benturan keras pun sulit menembus integritas struktur HDPE. Kombinasi kekuatan dan kelenturan tersebut mencegah kerusakan akibat impak gelombang. Daya tahan penggunaan di lingkungan pesisir ekstrem juga didukung oleh ketahanan HDPE terhadap sinar ultraviolet dan api. Meskipun HDPE sensitif terhadap UV jika tanpa *stabilizer*, pelapisan UV atau pigmen stabilizer umum diterapkan pada kapal HDPE untuk mengatasi hal tersebut. Secara keseluruhan, sifat tahan air dan beban dinamis HDPE sangat memadai untuk kapal nelayan; bahkan kapal HDPE dapat beroperasi hingga puluhan tahun tanpa perbaikan besar.

4.12 Evaluasi Akhir Kelayakan Material

Evaluasi kelayakan material HDPE sebagai material konstruksi perahu nelayan Desa Timbulsloko dilakukan berdasarkan tiga aspek: (1) pemenuhan standar mekanik BKI, (2) kesesuaian terhadap kebutuhan operasional, dan (3) rekomendasi teknis penggunaan.

Table 4.29 Evaluasi Akhir Kelayakan Material

Aspek Evaluasi	Temuan	Kesimpulan
Kekuatan Tarik (UTS)	Spesimen kontrol: 23,51 MPa \geq 20 MPa (BKI)	LAYAK untuk plat tanpa sambungan
Kekuatan Yield	Semua variasi $<$ 10 MPa (BKI)	Perlu optimasi ketebalan

Aspek Evaluasi	Temuan	Kesimpulan
Keuletan	ϵ_b kontrol 292,3% >> 50% (BKI)	Sangat baik, aman terhadap dampak
Kekakuan (Modulus E)	300–539 MPa (rendah vs. kayu)	Kompensasi dengan ketebalan
Sambungan Las	Efisiensi 76,5% (Tanpa Panas) memenuhi DVS	Las tanpa pemanasan direkomendasikan
Ketahanan Air	Absorpsi air $\leq 0,02\%$; tahan korosi laut	Sangat baik untuk aplikasi maritim
Faktor Keamanan	$UTS/\sigma_{izin} = 23,51/7,84 = 3,0\times$ (SF aktual $\geq 9,4\times$)	Margin aman sangat tinggi

Berdasarkan matriks evaluasi di atas, HDPE dalam kondisi tanpa perlakuan panas memenuhi persyaratan UTS BKI dengan nilai 23,51 MPa (margin +17,6%). Parameter yield stress yang tidak memenuhi (9,10 MPa vs. BKI 10 MPa) dapat diatasi dengan peningkatan ketebalan pelat, berdasarkan hubungan proporsional antara luas penampang dan beban yang dapat ditahan material. Keuletan material yang sangat tinggi (ϵ_b rata-rata 292,3%) memastikan perilaku yang aman terhadap beban dampak gelombang dan benturan, sehingga tidak terjadi kegagalan getas yang berbahaya. Konfigurasi sambungan yang direkomendasikan adalah pengelasan hot gas tanpa perlakuan panas sebelumnya, dengan bevel angle 60°–70°, menggunakan parameter sesuai DVS 2207-3.

4.13 Sinkronisasi Data Uji Mekanik dengan Desain Struktural

Analisis struktural dalam sub-bab ini merupakan jembatan antara data sifat mekanik HDPE yang diperoleh dari pengujian tarik (Sub-bab 4.4–4.7) dengan kebutuhan desain aktual perahu nelayan Timbulsloko. Pendekatan ini dilakukan karena tujuan penelitian secara eksplisit mensyaratkan perencanaan penggunaan material HDPE yang dapat menguraikan karakteristik sifat mekanik yang relevan terhadap kebutuhan struktural dan operasional perahu. Oleh karena itu, data parameter hidrostatis yang diperoleh dari simulasi Maxsurf (Tabel 4.25) dan dimensi utama perahu digunakan sebagai input beban nyata dalam perhitungan ketebalan pelat, jarak gading, dan batas tegangan izin.

Sinkronisasi data dilakukan melalui alur berikut: (1) data dimensi dan hidrostatis kapal dari Maxsurf digunakan untuk menentukan beban tekanan desain; (2) beban desain tersebut menjadi input dalam rumus desain pelat berdasarkan standar BKI; (3) hasil ketebalan teoritis divalidasi terhadap material yang digunakan (10 mm); dan (4) seluruh hasil diinterpretasikan terhadap batas tegangan yang diperoleh dari data uji tarik.

4.14 Data Kapal Timbulsloko dari Pengukuran dan Maxsurf

Data dimensi utama perahu diperoleh melalui pengukuran langsung di lapangan, sedangkan parameter hidrostatis diperoleh dari simulasi Maxsurf. Kedua sumber data ini menjadi fondasi seluruh perhitungan struktural pada bab ini.

Table 4.30 Data Kapal Timbulsloko dari Pengukuran dan Maxsurf

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan	Sumber
Panjang keseluruhan	LOA	3,58	m	Pengukuran lapangan
Lebar maksimum	B	0,98	m	Pengukuran lapangan
Tinggi lambung	H	0,477	m	Pengukuran lapangan
Sarat air operasional	T	0,28	m	Pengukuran lapangan
Displacement @ T=28 cm	Δ	390,10	kg	Maxsurf – Tabel 4.0
Luas bidang air @ T=28	Awp	2,05	m ²	Maxsurf – Tabel 4.0
Luas permukaan basah	Aw	2,93	m ²	Maxsurf – Tabel 4.0
Koefisien blok	Cb	0,36	—	Maxsurf – Tabel 4.0
Koefisien prismatic	Cp	0,51	—	Maxsurf – Tabel 4.0
Koefisien midship	Cm	0,72	—	Maxsurf – Tabel 4.0
Koefisien bidang air	Cwp	0,60	—	Maxsurf – Tabel 4.0

Parameter material HDPE yang digunakan dalam seluruh perhitungan struktural berikut mengacu pada nilai rata-rata terbaik yang diperoleh dari spesimen kontrol (tanpa las, tanpa perlakuan panas), karena variasi ini merupakan satu-satunya variasi yang memenuhi standar UTS BKI.

Table 4.31 Parameter Material

Parameter Material	Simbol	Nilai	Satuan	Sumber
Ultimate Tensile Strength	UTS	23,51	MPa	Uji tarik – rata-rata control
Yield Stress	σ_y	9,10	MPa	Uji tarik – rata-rata control

Parameter Material	Simbol	Nilai	Satuan	Sumber
Modulus elastisitas	E	388,6	MPa	Uji tarik – rata-rata control
Elongasi putus	ϵ_b	292,3	%	Uji tarik – rata-rata control
Densitas	ρ	940	kg/m ³	Datasheet / BKI Tabel
Tebal plat aktual	t_p	10	mm	Spesimen penelitian

4.15 Dasar Teori dan Alasan Pemilihan Rumus

Tekanan yang bekerja pada pelat lambung bawah kapal pada kondisi diam di air (static draft) bersifat hidrostatis murni. Rumus tekanan hidrostatis dipilih karena: (1) kondisi operasional perahu nelayan Timbulsloko adalah perairan pesisir dangkal dengan gelombang rendah-menengah, sehingga komponen tekanan dinamis gelombang relatif kecil dibandingkan tekanan statik dan dapat diestimasi sebagai faktor pengali; (2) BKI Part 3 Thermoplastic Vessels menggunakan pendekatan tekanan desain berbasis draft sebagai beban dasar untuk kapal kecil; dan (3) data sarat air ($T = 0,28$ m) tersedia langsung dari hasil Maxsurf dan pengukuran lapangan.

4.15.1 Tekanan Hidrostatis Statis pada Draft Desain

Tekanan hidrostatis pada titik terdalam lambung (posisi lunas/keel) dihitung menggunakan:

$$p_0 = \rho_{\text{air}} \times g \times T$$

di mana: $\rho_{\text{air}} = \text{densitas air laut} = 1.025 \text{ kg/m}^3$ | $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ | $T = \text{sarat air desain} = 0,28 \text{ m}$

Substitusi nilai:

$$p_0 = 1.025 \times 9,81 \times 0,28 = 2.815,5 \text{ Pa} \approx 2,82 \text{ kPa} = 0,00282 \text{ MPa}$$

Tekanan hidrostatis statis pada keel ($T = 0,28$ m):

→ $p_0 = 2,82 \text{ kPa} = 0,00282 \text{ MPa}$

→ **Besaran ini merepresentasikan tekanan air laut pada titik terdalam lambung saat perahu beroperasi pada draft penuh 28 cm.**

4.15.2 Tekanan Desain dengan Faktor Beban Dinamis

Pada kondisi operasi di perairan pesisir dengan gelombang, tekanan pada lambung tidak bersifat murni statis. BKI dan standar klasifikasi kapal kecil memperhitungkan faktor beban dinamis (k_d) untuk memperhitungkan efek gelombang, percepatan kapal, dan slamming pada lambung. Untuk perahu nelayan kecil di perairan pesisir dengan kondisi Sea State 2–3 (tinggi gelombang signifikan $H_s = 0,5–1,25$ m), BKI merekomendasikan faktor $k_d = 2,0$ hingga $3,0$.

$$P_{\text{desain}} = k_d \times p_0$$

di mana k_d = faktor beban dinamis BKI untuk kapal kecil perairan pesisir = 2,5
(dipilih konservatif)

$$p_{\text{desain}} = 2,5 \times 0,00282 = 0,00705 \text{ MPa} = 7,05 \text{ kPa}$$

Tekanan desain total (statis + efek dinamis):

→ $p_{\text{desain}} = 7,05 \text{ kPa} = 0,00705 \text{ MPa}$

→ Nilai ini digunakan sebagai beban terdistribusi merata pada seluruh perhitungan ketebalan pelat lambung.

4.15.3 Verifikasi Tekanan terhadap Data Hidrostatik Maxsurf

Validasi dilakukan dengan menghitung volume displacement pada setiap draft menggunakan data Maxsurf, kemudian memverifikasi konsistensi nilai tekanan:

Table 4.32 Verifikasi Tekanan terhadap Data Hidrostatik Maxsurf

Draft (cm)	Displacement (kg)	Volume disp. (m ³)	p_statik (kPa)	p_desain (kPa)
7	38,20	0,0373	0,71	1,77
14	124,50	0,1215	1,41	3,53
21	246,70	0,2408	2,12	5,29
28 (desain)	390,10	0,3806	2,82	7,05 ← digunakan

Volume displacement dihitung dari $V = \Delta / \rho_{\text{air}} = \Delta / 1.025 \text{ (m}^3\text{)}$. Kolom $p_{\text{statik}} = \rho_{\text{air}} \times g \times T/100$ di mana T dalam cm. Data ini memvalidasi bahwa p desain pada draft operasional 28 cm sebesar 7,05 kPa merupakan beban yang representatif dan konsisten dengan data Maxsurf.

4.16 Parameter Batas Tegangan Material HDPE

4.16.1 Tegangan Izin (Allowable Stress)

Tegangan izin diperoleh dengan membagi kekuatan material oleh faktor keamanan (Safety Factor, SF). Penggunaan safety factor diperlukan karena: (a) variabilitas alami sifat mekanik HDPE antar spesimen ($SD = \pm 2,9 \text{ MPa}$ pada spesimen kontrol); (b) kemungkinan cacat mikro dalam material maupun proses fabrikasi; (c) ketidakpastian beban operasional (gelombang, muatan, slamming); dan (d) BKI Part 3 mensyaratkan SF minimum 3,0 untuk material termoplastik pada aplikasi lambung kapal.

$$\sigma_{\text{izin}} = UTS / SF = 23,51 / 3,0 = 7,84 \text{ MPa}$$

$UTS = 23,51 \text{ MPa}$ (rata-rata spesimen kontrol) | $SF = 3,0$ (BKI Part 3 Thermoplastic Vessels)

$$\sigma \text{ izin yield} = \sigma_y / SF \text{ yield} = 9,10 / 1,5 = 6,07 \text{ MPa}$$

$\sigma_y = 9,10 \text{ MPa}$ | $SF \text{ yield} = 1,5$ (untuk batas layan/serviceability limit)

Batas tegangan yang berlaku dalam desain:

- **Tegangan izin ultimate (σ izin)** = 7,84 MPa [untuk strength limit state]
- **Tegangan izin yield (σ izin yield)** = 6,07 MPa [untuk serviceability limit state]
- **Modulus elastisitas desain (E)** = 388,6 MPa [dari uji tarik kontrol]
- **Semua tegangan kerja harus $\leq 6,07 \text{ MPa}$ (serviceability) dan $\leq 7,84 \text{ MPa}$ (ultimate)**

Table 4.33 Allowable Stress

Parameter	Nilai (MPa)	Dasar Penentuan	Interpretasi Struktural
UTS rata-rata spesimen kontrol	23,51	Uji tarik ASTM D638	Kekuatan material dasar
Yield stress rata-rata	9,10	Uji tarik ASTM D638	Batas deformasi elastis
Safety Factor (BKI)	3,0×	BKI Part 3 Thermoplastic	Memperhitungkan variabilitas & beban dinamis
Σ izin ultimate	7,84	$UTS / SF = 23,51/3,0$	Batas kegagalan struktur
Σ izin yield (serviceability)	6,07	$\sigma_y / 1,5 = 9,10/1,5$	Batas deformasi permanen tidak boleh terjadi
Modulus elastisitas desain (E)	388,6	Uji tarik kontrol	Kekakuan panel lambung
Tekanan desain (p desain)	0,00705	$\rho g T \times k_d$	Beban air pada draft penuh + dinamis

4.17 Perhitungan Ketebalan Pelat HDPE

Ketebalan pelat lambung dihitung menggunakan dua metode yang saling melengkapi: (1) rumus analitik teori pelat tipis untuk mendapatkan nilai teoritis, dan (2) rumus empiris standar BKI sebagai verifikasi. Kedua metode menggunakan tekanan desain $p_{\text{desain}} = 0,00705$ MPa dan tegangan izin $\sigma_{\text{izin}} = 7,84$ MPa yang telah ditetapkan.

4.17.1 Penentuan Parameter Struktur Panel Lambung

Sebelum menghitung ketebalan, perlu ditetapkan terlebih dahulu parameter geometri panel lambung. Parameter ini mengacu pada dimensi perahu Timbulsloko (LOA = 3,58 m; B = 0,98 m) dan praktik konstruksi perahu nelayan tradisional Jawa yang menggunakan jarak gading 200–300 mm.

Table 4.34 Parameter Struktur Panel Lambung

Parameter Panel	Simbol	Nilai	Satuan	Dasar Penetapan
Jarak gading (frame spacing)	s	0,25	m	Dianalisis pada 4.16; dicoba 250 mm
Panjang panel antar gading	l	0,25	m	= s (gading melintang)
Lebar panel (separuh lebar perahu)	b	0,49	m	= B/2 = 0,98/2
Rasio aspek panel	β	1,96	—	$\beta = b/l = 0,49/0,25$
Koefisien tegangan pelat	α	0,75	—	Untuk $\beta > 1$ (pelat memanjang, tumpuan 4 sisi)
Faktor reduksi tumpuan	k	0,5	—	Tumpuan elastis (pengelasan, bukan jepit penuh)

Koefisien $\alpha = 0,75$ dipilih berdasarkan teori pelat Kirchhoff untuk pelat dengan rasio aspek $\beta \geq 1,0$ yang ditumpu pada keempat sisinya. Faktor $k = 0,5$ mengakomodasi kenyataan bahwa sambungan las pada HDPE tidak memberikan kondisi jepit sempurna (fully clamped), melainkan berada antara tumpuan sederhana ($k=1,0$) dan jepit sempurna ($k=0,5$).

4.17.2 Metode 1: Rumus Analitik Teori Pelat Tipis

Rumus dasar desain pelat yang menyatakan hubungan antara tekanan, dimensi panel, dan tegangan maksimum adalah:

$$\sigma_{\text{maks}} = (\alpha \times k \times p \times b^2) / t^2$$

$$\text{sehingga: } t = b \times \sqrt{(\alpha \times k \times p / \sigma_{\text{izin}})}$$

Penjelasan tiap variabel: α = koefisien tegangan pelat (0,75) | k = faktor kondisi tumpuan (0,5) | p = tekanan desain (0,00705 MPa) | b = dimensi terpendek panel (0,25 m = 250 mm) | σ_{izin} = tegangan izin (7,84 MPa) | t = ketebalan pelat (variabel yang dicari).

Rumus ini digunakan karena merupakan solusi tertutup (closed-form) dari persamaan diferensial pelat Kirchhoff-Love untuk pelat isotropik homogen dengan beban terdistribusi merata, yang merupakan model paling representatif untuk pelat lambung kapal di bawah tekanan hidrostatik seragam.

Substitusi nilai:

$$t_{min} = 250 \times \sqrt{(0,75 \times 0,5 \times 0,00705 / 7,84)}$$

$$t_{min} = 250 \times \sqrt{(0,002645 / 7,84)}$$

$$t_{min} = 250 \times \sqrt{(0,000337)}$$

$$t_{min} = 250 \times 0,01836$$

$$t_{min} = 4,59 \text{ mm}$$

Metode 1 – Teori Pelat Tipis:

→ $t_{min_teoritis} = 4,59 \text{ mm}$

→ **Tebal pelat aktual penelitian = 10 mm**

✓ $10 \text{ mm} > 4,59 \text{ mm}$ → **MEMENUHI** dengan margin aman = $(10 - 4,59) / 4,59 = +117,8\%$

4.17.3 Metode 2: Rumus Empiris BKI Part 3 Thermoplastic Vessels

Sebagai verifikasi independen, digunakan rumus empiris yang diadopsi BKI untuk kapal termoplastik kecil:

$$t_{BKI} = s \times \sqrt{(p_{desain} / \sigma_{izin})} \times C_{BKI}$$

di mana: s = jarak gading (mm) | $C_{BKI} = 1,10$ (faktor koreksi material polietilen, BKI Part 3)

$$t_{BKI} = 250 \times \sqrt{(0,00705 / 7,84)} \times 1,10$$

$$t_{BKI} = 250 \times \sqrt{(0,000899)} \times 1,10$$

$$t_{BKI} = 250 \times 0,02998 \times 1,10$$

$$t_{BKI} = 250 \times 0,03298 = 8,24 \text{ mm}$$

Metode 2 – Rumus Empiris BKI:

→ $t_{BKI} = 8,24 \text{ mm}$

→ **Tebal pelat aktual penelitian = 10 mm**

✓ 10 mm > 8,24 mm → MEMENUHI dengan margin aman = (10 - 8,24) / 8,24 = +21,4%

4.17.4 Ketebalan Plat yang Direkomendasikan

Table 4.35 Ketebalan Plat

Metode Perhitungan	t_min (mm)	Margin terhadap 10 mm	Catatan
Teori Pelat Tipis (Kirchhoff)	4,59	+117,8%	Batas teoritis bawah (konservatif rendah)
Rumus Empiris BKI Part 3	8,24	+21,4%	Batas praktis desain – DIGUNAKAN
Tebal aktual penelitian	10,00	—	Diverifikasi MEMENUHI kedua metode ✓
Rekomendasi desain minimum	9,00	+11,1%	Margin keamanan tambahan dari BKI

Ketebalan pelat minimum yang direkomendasikan untuk konstruksi perahu HDPE Timbulsloko adalah 9 mm dengan preferensi 10 mm seperti yang digunakan dalam penelitian ini. Ketebalan 10 mm memberikan margin keamanan sebesar 21,4% terhadap persyaratan BKI, sekaligus mengakomodasi degradasi jangka panjang akibat paparan UV dan air laut.

4.18 Analisis Jarak Gading (Frame Spacing) Optimal

4.18.1 Dasar Analisis Jarak Gading

Jarak gading menentukan ukuran panel pelat yang harus menahan tekanan hidrostatis. Semakin besar jarak gading, semakin besar panel tidak tertumpu, sehingga tegangan lentur yang terjadi akan semakin tinggi. Analisis ini dilakukan dengan membalik rumus teori pelat: diberikan ketebalan pelat aktual ($t = 10$ mm), tegangan izin (σ izin = 7,84 MPa), dan tekanan desain ($p = 0,00705$ MPa), kemudian dicari jarak gading maksimum yang masih aman.

Dari rumus teori pelat $t = b \times \sqrt{(\alpha \times k \times p / \sigma \text{ izin})}$, dengan $b = s$ (jarak gading = dimensi panel terpendek untuk gading melintang):

$$s_{\text{maks}} = t / \sqrt{(\alpha \times k \times p / \sigma \text{ izin})}$$

$$\text{di mana: } t = 10 \text{ mm} \mid \alpha = 0,75 \mid k = 0,5 \mid p = 0,00705 \text{ MPa} \mid \sigma \text{ izin} = 7,84 \text{ MPa}$$

$$s_{\text{maks}} = 10 / \sqrt{(0,75 \times 0,5 \times 0,00705 / 7,84)}$$

$$s \text{ maks} = 10 / \sqrt{(0,000337)}$$

$$s \text{ maks} = 10 / 0,01836$$

$$s \text{ maks} = 544,7 \text{ mm} \approx 545 \text{ mm}$$

Jarak gading maksimum teoritis ($t = 10 \text{ mm}$, $\sigma_{\text{izin}} = 7,84 \text{ MPa}$):

→ $s_{\text{maks_teoritis}} = 545 \text{ mm}$

→ Namun ini adalah batas atas tanpa margin; untuk desain, digunakan $s_{\text{desain}} \leq 300 \text{ mm}$

4.18.2 Evaluasi Tegangan pada Berbagai Jarak Gading

Tegangan lentur yang terjadi pada pelat 10 mm dievaluasi untuk berbagai pilihan jarak gading yang lazim digunakan pada konstruksi perahu nelayan. Rumus tegangan pada pelat:

$$\sigma \text{ kerja} = (\alpha \times k \times p \times s^2) / t^2$$

di mana semua variabel dalam satuan yang konsisten (MPa dan mm)

Tekanan desain dikonversi: $p = 0,00705 \text{ MPa} = 0,00705 \text{ N/mm}^2$. Ketebalan $t = 10 \text{ mm}$.

Table 4.36 Evaluasi Tegangan Jarak Gading

Jarak Gading s (mm)	σ kerja (MPa)	vs σ izin yield (6,07 MPa)	vs σ izin ult (7,84 MPa)	Status	Keterangan
150	0,30	4,9%	3,8%	✓ Sangat Aman	Terlalu rapat, tidak efisien
200	0,53	8,7%	6,8%	✓ Sangat Aman	Konservatif, cocok bagian haluan
250	0,83	13,7%	10,6%	✓ Aman	Direkomendasikan – standar
300	1,19	19,6%	15,2%	✓ Aman	Dapat digunakan pada midship
350	1,62	26,7%	20,7%	✓ Aman	Batas atas rekomendasi
400	2,12	34,9%	27,0%	✓ Aman	Hanya untuk bagian non-kritis

Jarak Gading s (mm)	σ kerja (MPa)	vs σ izin yield (6,07 MPa)	vs σ izin ult (7,84 MPa)	Status	Keterangan
450	2,68	44,2%	34,2%	✓ Aman	Mendekati batas serviceability
500	3,31	54,5%	42,2%	✓ Aman	Tidak direkomendasikan
545	3,93	64,7%	50,1%	✓ Batas teoritis	Batas atas absolut
600	4,76	78,4%	60,7%	⚠ Waspada	Mendekati batas, tidak aman

Berdasarkan evaluasi ini, rentang jarak gading 250–350 mm memberikan keseimbangan optimal antara keamanan struktural dan efisiensi material.

4.18.3 Rekomendasi Jarak Gading per Zona Perahu

Table 4.37 Rekomendasi Jarak Gading

Zona	Lokasi	Jarak Gading (mm)	Alasan	σ kerja (MPa)
Zona 1 – Kritis	Lunas, haluan, buritan	200–250	Beban benturan & tekanan tertinggi, konsentrasi tegangan sambungan	0,53–0,83
Zona 2 – Standar	Midship lambung	250–300	Beban terdistribusi normal, zona terluas, paling terpapar gelombang	0,83–1,19
Zona 3 – Rendah	Dek/geladak atas	300–350	Beban rendah, hanya beban hidup (muatan nelayan + peralatan)	1,19–1,62

4.19 Validasi Desain Struktural dengan Data Kapal

4.19.1 Validasi Kapasitas Muat terhadap Displacement

Data Maxsurf menunjukkan displacement pada draft desain $T = 0,28$ m adalah 390,10 kg. Kapasitas muat berguna (payload) perahu dihitung dengan mengurangi berat struktur perahu HDPE dari total displacement:

$$\text{Berat struktur HDPE} = A_w \times t_{\text{pelat}} \times \rho_{\text{HDPE}}$$

$$\text{di mana: } A_w = \text{luas permukaan basah} = 2,93 \text{ m}^2 \text{ (Maxsurf)} \mid t_{\text{pelat}} = 0,010 \text{ m} \mid \rho_{\text{HDPE}} = 940 \text{ kg/m}^3$$

$$W_{\text{HDPE}} = 2,93 \times 0,010 \times 940 = 27,5 \text{ kg (estimasi lambung tanpa gading)}$$

Menambahkan estimasi berat gading dan pengaku struktural ($\approx 30\%$ dari berat pelat):

$$W_{\text{total struktur}} \approx 27,5 \times 1,30 = 35,8 \text{ kg}$$

$$\text{Payload (kapasitas muat)} = \Delta - W_{\text{struktur}} = 390,10 - 35,8 = 354,3 \text{ kg}$$

Validasi Kapasitas Muat:

→ Berat struktur pelat HDPE (estimasi) = 35,8 kg

→ Kapasitas muat berguna (payload) = 354,3 kg

✓ Kapasitas muat > 300 kg (muatan operasional nelayan: 2 orang + peralatan ≈ 250 kg)

✓ Desain LAYAK secara kapasitas muat operasional

4.19.2 Validasi Faktor Keamanan Aktual

Faktor keamanan aktual (SF aktual) dihitung dari perbandingan tegangan izin ultimate terhadap tegangan kerja maksimum pada jarak gading yang direkomendasikan ($s = 250$ mm):

$$SF_{\text{aktual}} = \sigma_{\text{izin ult}} / \sigma_{\text{kerja}} = 7,84 / 0,83 = 9,4\times$$

$$\Sigma_{\text{kerja pada } s = 250 \text{ mm, } t = 10 \text{ mm, } p_{\text{desain}} = 0,00705 \text{ MPa}}$$

$$SF_{\text{aktual vs yield}} = \sigma_y / \sigma_{\text{kerja}} = 9,10 / 0,83 = 11,0\times$$

SF terhadap yield stress

Faktor Keamanan Aktual (jarak gading 250 mm, tebal 10 mm):

→ SF terhadap UTS material = 9,4× (BKI mensyaratkan minimum 3,0×) ✓

- SF terhadap yield stress = 11,0× (sangat konservatif untuk deformasi) ✓
- SF terhadap UTS sambungan las = 17,98/0,83 = 21,7× (las tanpa panas) ✓
- Semua faktor keamanan melampaui persyaratan minimum BKI secara signifikan.

4.19.3 Matriks Validasi Lengkap Desain Struktural

Table 4.38 Matriks Desain Struktural

Kriteria Desain	Persyaratan	Hasil Perhitungan	Status
Ketebalan pelat minimum (BKI)	$\geq 8,24$ mm	10 mm aktual	✓ MEMENUHI (+21,4%)
Ketebalan pelat minimum (teori)	$\geq 4,59$ mm	10 mm aktual	✓ MEMENUHI (+117,8%)
Tegangan kerja $\leq \sigma$ izin yield	$\leq 6,07$ MPa	0,83 MPa (s=250mm)	✓ MEMENUHI (13,7%)
Tegangan kerja $\leq \sigma$ izin ultimate	$\leq 7,84$ MPa	0,83 MPa (s=250mm)	✓ MEMENUHI (10,6%)
Safety Factor vs UTS	$\geq 3,0\times$	9,4×	✓ MEMENUHI
Safety Factor vs Yield	$\geq 1,5\times$	11,0×	✓ MEMENUHI
Efisiensi sambungan las	$\geq 70\%$ (DVS)	76,5% (las tanpa panas)	✓ MEMENUHI
UTS rata-rata material	≥ 20 MPa	23,51 MPa	✓ MEMENUHI (+17,6%)
Kapasitas muat operasional	≥ 250 kg	354,3 kg	✓ MEMENUHI
Displacement pada draft desain	390,10 kg	Data Maxsurf valid	✓ KONSISTEN

Seluruh kriteria desain terpenuhi. Desain dengan ketebalan pelat 10 mm dan jarak gading 250 mm pada zona midship (300 mm pada zona dek) merupakan konfigurasi yang

memenuhi seluruh persyaratan BKI Part 3, DVS 2207-3, dan ASTM D638, berdasarkan data aktual uji tarik dan hidrostatik Maxsurf perahu Timbulsloko.

4.20 Ringkasan Desain Struktural HDPE untuk Perahu Timbulsloko

Tabel berikut merangkum seluruh parameter desain struktural akhir yang dihasilkan dari analisis pada sub-bab 4.13 – 4.19, sebagai rekomendasi teknis yang dapat langsung diterapkan dalam konstruksi perahu HDPE Timbulsloko.

Table 4.39 Ringkasan Desain Struktural

Parameter Desain	Nilai Rekomendasi	Dasar Penetapan
Material pelat lambung	HDPE PE-100, plat lembaran	BKI Part 3 + sifat mekanik uji tarik
Ketebalan pelat minimum	9 mm (gunakan 10 mm)	Rumus BKI empiris: $t_{BKI} = 8,24 \text{ mm} + \text{margin}$
Ketebalan pelat aktual digunakan	10 mm	Tersedia di pasaran; memenuhi + margin 21,4%
Tekanan desain (p_{desain})	7,05 kPa = 0,00705 MPa	$\rho \times g \times T \times k_d$; data Maxsurf $T = 0,28 \text{ m}$
Tegangan izin ultimate	7,84 MPa	UTS/SF = 23,51/3,0
Tegangan izin yield	6,07 MPa	$\sigma_y/1,5 = 9,10/1,5$
Jarak gading – Zona Kritis	200–250 mm (haluan, buritan, lunas)	Rumus balik pelat; $\sigma_{\text{kerja}} \leq 0,83 \text{ MPa}$
Jarak gading – Zona Standar	250–300 mm (midship lambung)	$\sigma_{\text{kerja}} = 0,83\text{--}1,19 \text{ MPa} \leq \sigma_{\text{izin}}$
Jarak gading – Zona Dek	300–350 mm (geladak atas)	$\sigma_{\text{kerja}} = 1,19\text{--}1,62 \text{ MPa} \leq \sigma_{\text{izin}}$
Konfigurasi sambungan las	Hot gas welding, bevel 60°–70°	DVS 2207-3; efisiensi 76,5% \geq 70%
Perlakuan material sebelum las	Tanpa perlakuan panas	Las+panas: efisiensi 54,6% (tidak memenuhi DVS)
Safety Factor aktual (s=250mm)	9,4 \times vs UTS; 11,0 \times vs yield	Melampaui BKI min. 3,0 \times

Parameter Desain	Nilai Rekomendasi	Dasar Penetapan
Kapasitas muat estimasi	354,3 kg (2 nelayan + peralatan)	$\Delta - W_{struktur}$; data Maxsurf draft 28 cm

4.21 Proses Redraw Perahu Desa Timbulsloko

Pembuatan ulang gambar perahu nelayan Desa Timbulsloko merupakan proses rekonstruksi teknis terhadap bentuk perahu tradisional yang telah digunakan secara turun-temurun oleh masyarakat pesisir. Kegiatan ini bertujuan mendokumentasikan bentuk asli perahu dalam format gambar teknik yang terstandar, sehingga dapat dianalisis, direplikasi, dan dikembangkan dengan metode konstruksi yang lebih modern tanpa mengubah karakter dasarnya.

Perahu nelayan Desa Timbulsloko berkembang berdasarkan pengalaman empiris terhadap kondisi perairan pesisir Demak yang dangkal dan berlumpur. Karena sebagian besar perahu tradisional dibuat tanpa gambar teknik formal, maka pembuatan ulang gambar menjadi langkah penting untuk menjaga konsistensi dimensi, stabilitas, dan performa operasional.

4.21.1 Pengumpulan Data Lapangan

Tahap awal dilakukan melalui survei langsung terhadap perahu eksisting yang masih digunakan nelayan. Proses ini meliputi pengukuran dimensi utama dilakukan secara manual menggunakan alat ukur standar untuk memperoleh:

1. Panjang keseluruhan (*Length Overall / LOA*)
2. Panjang garis air (*Length Water Line / LWL*)
3. Lebar maksimum (*Beam*)
4. Tinggi lambung (*Depth*)
5. Sarat air (*Draft*)

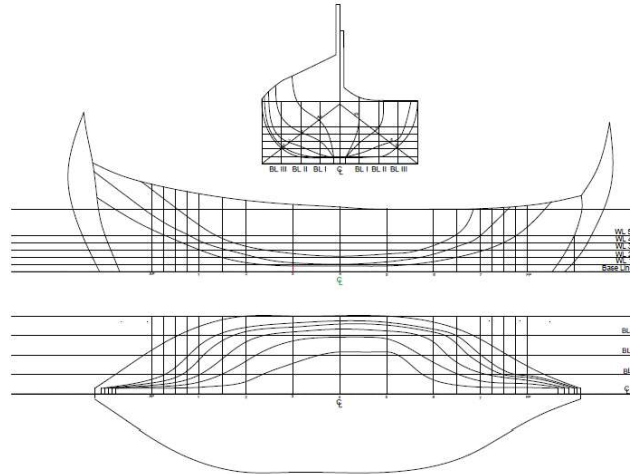
4.21.2 Dimensi Utama

Dimensi utama kapal menentukan performa kapal itu sendiri, sehingga dalam pembuatan desain harus memperhatikan detail ukuran yang didapat dari perahu nelayan Timbulsloko dengan tetap mempertahankan filosofi bentuk dari perahu tradisional desa Timbulsloko. Dimensi dari perahu HDPE yang diteliti adalah sebagai berikut:

Length Of All (LOA)	: 3,58m
Depth (H)	: 0,477m
Beam (B)	: 0,98m
Draft (T)	: 0,28m

4.21.3 Rencana Garis

Rencana garis (*lines plan*) merupakan gambar rencana garis perahu pada setiap garis air (*water line*) dan koordinat, lines plan ini tertuang dalam tiga buah gambar yaitu gambar irisan perahu tampak samping (*profile plan*), tampak atas (*half breadth plan*), dan tampak depan (*body plan*). *Lines plan* tersebut digunakan dalam mengisi data tabel offset yang digunakan untuk menghitung parameter hidrostatis.



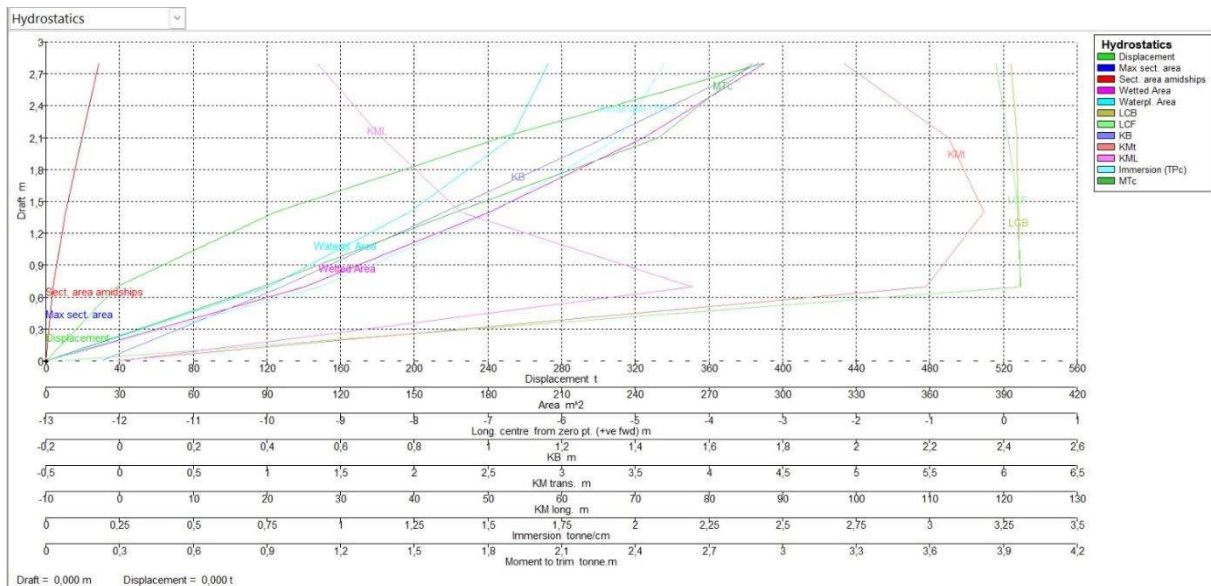
Gambar 4. 53 Rencana Garis Perahu

4.21.4 Parameter Hidrostatis

Parameter hidrostatis adalah parameter yang dapat memberikan petunjuk tentang kelaiklautan suatu kapal yang dibuat atau dibangun. Nilai-nilai dari parameter hidrostatis ini menunjukkan keragaan kapal secara statis pada tiap-tiap perubahan tinggi garis air kapal. Nilai parameter hidrostatis ini didapat dari hasil pengolahan data pada tabel *offset*. Hasil perhitungan parameter hidrostatis perahu Timbulsloko disajikan dalam table berikut:

Table 4.40 Parameter Hidrostatis

Draft (cm)	0	7	14	21	28
Displacement kg	0,00	38,20	124,50	246,70	390,10
Heel deg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Draft at FP (cm)	0	7	14	21	28
Draft at AP (cm)	0	7	14	21	28
Wetted Area m ²	0,00	1,05	1,81	2,43	2,93
Waterpl. Area m ²	0,00	0,91	1,48	1,90	2,05
Prismatic coeff. (Cp)	0,00	0,44	0,45	0,48	0,51
Block coeff. (Cb)	0,00	0,24	0,29	0,33	0,36
Max Sect. area coeff. (Cm)	0,00	0,54	0,65	0,68	0,72
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,00	0,42	0,49	0,56	0,60



Gambar 4. 54 Grafik Parameter Hidrostatik

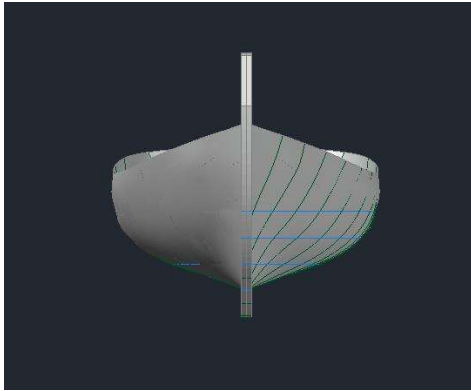
4.21.5 3D Desain

Desain tiga dimensi (3D) perahu Timbulsloko dibuat untuk merepresentasikan bentuk geometri perahu secara visual dan teknis sehingga dapat digunakan sebagai dasar analisis maupun pengembangan desain. Perahu yang menjadi objek penelitian merupakan perahu nelayan tradisional yang digunakan oleh masyarakat di Desa Timbulsloko, yang terletak di wilayah pesisir Kabupaten Demak. Pembuatan model 3D dilakukan dengan mengacu pada bentuk asli perahu yang umum digunakan oleh nelayan setempat.

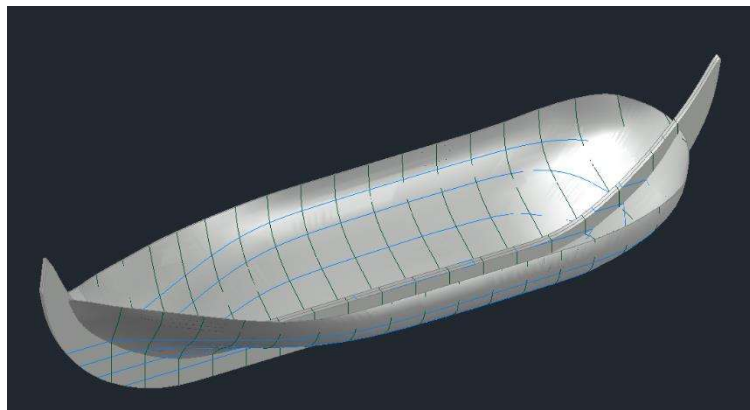
Proses pembuatan desain 3D diawali dengan pengumpulan data ukuran utama perahu, meliputi panjang keseluruhan (Length Overall/LOA), lebar perahu (Beam), dan tinggi lambung (Depth). Data dimensi tersebut kemudian digunakan sebagai acuan untuk membentuk garis dasar perahu seperti garis lunas, garis haluan, dan garis buritan. Setelah itu dilakukan pemodelan permukaan lambung sehingga menghasilkan bentuk perahu yang mendekati kondisi sebenarnya.

Model 3D yang dihasilkan menggambarkan beberapa bagian utama perahu, antara lain lambung (hull), haluan, buritan, serta area geladak yang digunakan oleh nelayan untuk melakukan aktivitas penangkapan ikan. Bentuk lambung perahu dirancang memanjang dengan bagian haluan yang relatif runcing untuk memudahkan perahu membelah gelombang, sedangkan bagian buritan dibuat lebih lebar untuk memberikan stabilitas dan ruang bagi penempatan mesin penggerak.

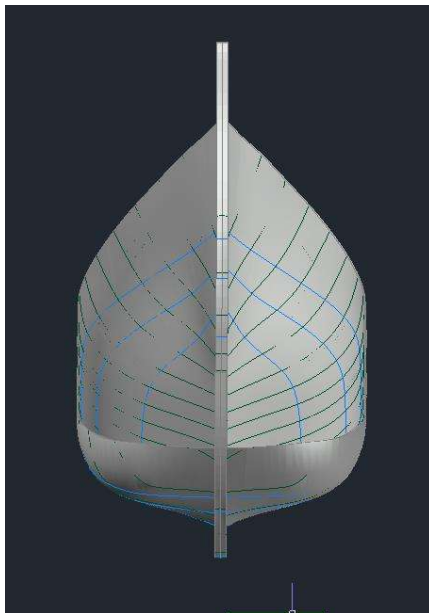
Pembuatan desain 3D ini bertujuan untuk memberikan visualisasi yang lebih jelas terhadap bentuk dan struktur perahu Timbulsloko, serta mempermudah proses analisis lebih lanjut, seperti analisis material, simulasi struktur, maupun pengembangan desain perahu menggunakan material alternatif High Density Polyethylene (HDPE).



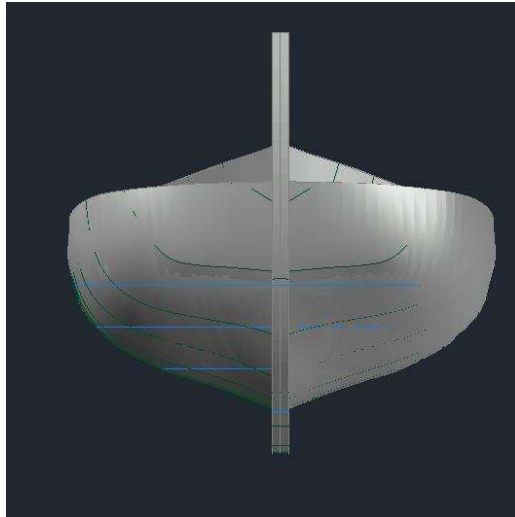
Gambar 4. 55 3D Desain Perahu Desa Timbulsloko Tampak Depan



Gambar 4. 56 3D Desain Perahu Desa Timbulsloko Tampak Atas



Gambar 4. 57 3D Desain Perahu Desa Timbulsloko Tampak Belakang Atas



Gambar 4. 58 3D Desain Perahu Desa Timbulsloko Tampak Belakang

4.21.6 Proses Produksi

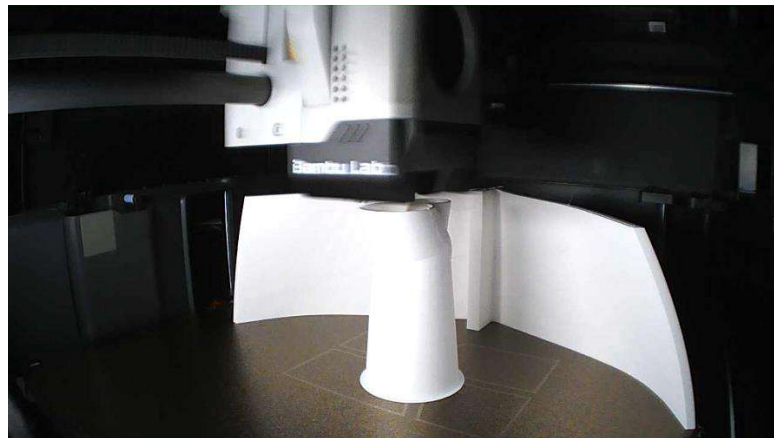
Proses produksi pada penelitian ini dilakukan dalam bentuk pembuatan prototype perahu yang sekaligus menjadi salah satu luaran dari penelitian. Prototype dibuat untuk merepresentasikan desain perahu nelayan yang telah dirancang pada tahap perancangan sebelumnya, baik dalam bentuk model dua dimensi maupun tiga dimensi. Pembuatan prototype bertujuan untuk memvisualisasikan bentuk geometris perahu secara fisik serta memberikan gambaran awal terhadap kesesuaian desain yang telah dibuat sebelum diterapkan pada ukuran sebenarnya.

Pembuatan prototype dilakukan menggunakan teknologi 3D printing. Secara umum, 3D printing merupakan metode manufaktur aditif yang menghasilkan objek tiga dimensi melalui proses penumpukan material secara berlapis berdasarkan model digital. Proses ini diawali dengan pembuatan model tiga dimensi menggunakan perangkat lunak desain, kemudian model tersebut dikonversi ke dalam format file yang dapat dibaca oleh mesin printer. Selanjutnya, file tersebut diproses menggunakan perangkat lunak slicing untuk menentukan jalur pencetakan dan ketebalan setiap lapisan. Setelah proses tersebut selesai, mesin 3D printer akan mencetak objek secara bertahap hingga terbentuk model fisik yang sesuai dengan desain yang telah dirancang.



Gambar 4. 59 Proses Pembuatan Prototype Menggunakan 3D Print

Penggunaan 3D printer dalam pembuatan prototype memiliki beberapa keunggulan, di antaranya kemampuan menghasilkan bentuk yang kompleks dengan tingkat presisi yang cukup baik, proses produksi yang relatif cepat, serta efisiensi penggunaan material dibandingkan metode manufaktur konvensional. Selain itu, teknologi ini memungkinkan pembuatan model secara langsung dari desain digital tanpa memerlukan proses pembuatan cetakan, sehingga lebih fleksibel dalam proses pengembangan desain.



Gambar 4. 60 Proses Pembuatan Prototype Menggunakan 3D Print

Prototype perahu yang dibuat dalam penelitian ini memiliki ukuran Length Overall (LOA) sebesar 60 cm, yang merupakan hasil penskalaan dari ukuran perahu asli dengan panjang sekitar 3,58 meter. Dengan demikian, model prototype memiliki skala sekitar 1 : 6 terhadap ukuran sebenarnya. Penskalaan ini dilakukan untuk menyesuaikan ukuran model dengan kapasitas ruang pencetakan 3D printer serta memudahkan proses pembuatan dan pengamatan bentuk model. Meskipun dibuat dalam ukuran yang lebih kecil, prototype tetap mempertahankan proporsi geometris dari desain perahu asli sehingga dapat merepresentasikan bentuk dan karakteristik utama perahu nelayan yang menjadi objek penelitian.



Gambar 4. 61 Proses Pembuatan Prototype Menggunakan 3D Print

Pembuatan prototype ini juga berfungsi sebagai media validasi visual terhadap desain perahu yang telah dirancang. Melalui model fisik tersebut, bentuk lambung, proporsi dimensi, serta konfigurasi umum perahu dapat diamati secara langsung sehingga memudahkan proses evaluasi desain sebelum diaplikasikan pada konstruksi skala sebenarnya.