

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

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

### 4.1 Pembuatan dan Pengukuran Spesimen

#### 4.1.1 Spesimen Uji Tarik

Pembuatan spesimen uji tarik dilakukan dengan mengacu pada standar ASTM E8/E8M sebagai pedoman pengujian tarik untuk material logam. Spesimen dibuat dengan dengan dimensi 200 mm × 20 mm × 12 mm.



Gambar 4. 1 Spesimen Uji Tarik

Tabel 4. 1 Tabel Sampling Uji Tarik

	Spesimen	Panjang	Lebar	Tebal
ASTM E8/E8M	UT120V1	200	20	12
	UT120V2	200	20	12
	UT120V3	200	20	12
	UT120V4	200	20	12
	UT150V1	200	20	12
	UT150V2	200	20	12
	UT150V3	200	20	12
	UT150V4	200	20	12
	UT120X1	200	20	12
	UT120X2	200	20	12
	UT120X3	200	20	12
	UT120X4	200	20	12
	UT150X1	200	20	12
	UT150X2	200	20	12
	UT150X3	200	20	12
	UT150X4	200	20	12

#### 4.1.2 Spesimen Uji Impact

Pembuatan spesimen uji impact dilakukan dengan mengacu pada standar ASTM E23 menggunakan metode Charpy Impact Test. Spesimen dibuat dengan dimensi 60 mm × 10 mm × 10 mm.



Gambar 4. 2 Gambar Spesimen Pengujian Impak

Tabel 4. 2 Sampling Uji Impak

	Spesimen	Panjang	Lebar	Tebal
ASTM E23	UI120V1	60	10	10
	UI120V2	60	10	10
	UI120V3	60	10	10
	UI120V4	60	10	10
	UI150V1	60	10	10
	UI150V2	60	10	10
	UI150V3	60	10	10
	UI150V4	60	10	10
	UI120X1	60	10	10
	UI120X2	60	10	10
	UI120X3	60	10	10
	UI120X4	60	10	10
	UI150X1	60	10	10
	UI150X2	60	10	10
	UI150X3	60	10	10
	UI150X4	60	10	10

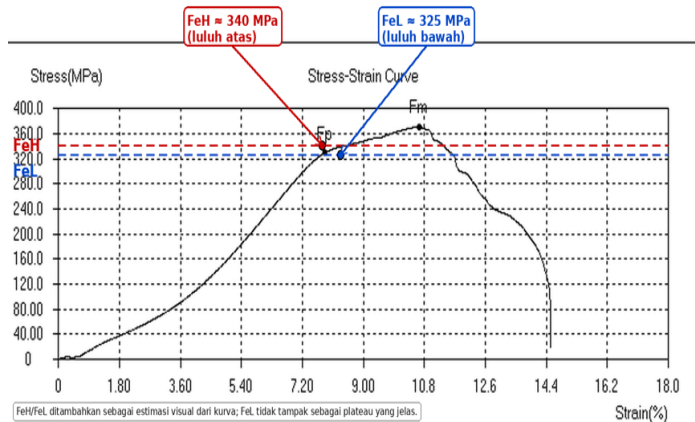
## 4.2 Pembahasan

### 4.2.1 Proses dan Hasil Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui kekuatan sambungan las dalam menerima beban tarik hingga mengalami patahan. Pengujian ini menggunakan spesimen yang telah dibuat mengacu pada standar ASTM E8/E8M dengan dimensi 200 mm × 20 mm × 12 mm. Proses pengujian dilaksanakan di *Welding School* Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro menggunakan alat uji tarik Universal Testing Machine (UTM).

#### 1) Spesimen UT120V1

Besar 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 grafik berikut:



Gambar 4. 3 Grafik Pengujian Tarik Spesimen UT120V1

Tabel 4. 3 Tabel Regangan-Tegangan Spesimen UT120V1

Parameter	Nilai
Fp	335 MPa
Fm	370 MPa
FeH	340 MPa
FeL	325 MPa
Elastis Limit	340 MPa
Strain Max	11%

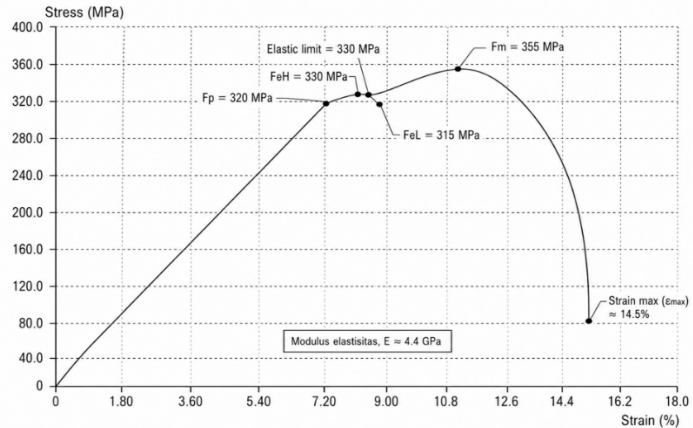
Perhitungan modulus elastisitas:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{300 - 0}{0,0314 - 0} = 9554 \text{ MPa} = 9,55 \text{ GPa}$$

Pada awal kurva, tegangan meningkat hampir linear seiring bertambahnya regangan, menandakan zona elastis. Ketika tegangan mencapai sekitar Fp 335 MPa, material mulai keluar dari perilaku elastis dan memasuki zona plastis. Tegangan luluh atas (FeH 340 MPa) dan luluh bawah (FeL 325 MPa) ditandai sebagai

batas awal deformasi plastis, sementara titik tegangan maksimum (Fm) menunjukkan kekuatan tarik maksimum sebelum mulai menurun. Dengan modulus elastisitas 9,55 GPa.

## 2) Spesimen UT120V2



Gambar 4. 4 Grafik Pengujian Tarik Spesimen UT120V2

Tabel 4. 4 Regangan - Tegangan Spesimen UT120V2

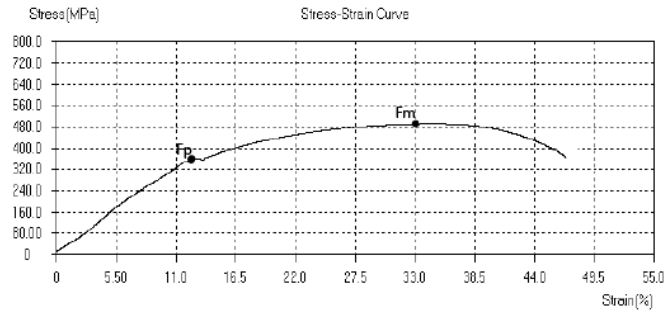
Parameter	Nilai
Fp	320 MPa
Fm	355 MPa
FeH	330 MPa
FeL	315 MPa
Elastis Limit	330 MPa
Strain Max	14,5%

Perhitungan modulus elastisitas:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{320 - 0}{0,072 - 0} = 4444 \text{ MPa} = 4,44 \text{ GPa}$$

Hasil grafik pada spesimen UT120V2 menunjukkan bahwa material yang awalnya mengalami kenaikan tegangan linear dalam zona elastis hingga mencapai batas proporsional pada Fp 320 MPa, kemudian memasuki zona plastis dengan tegangan luluh atas FeH 330 MPa dan luluh bawah FeL 315 MPa, mencapai tegangan maksimum Fm 355 MPa sebelum menurun, dengan regangan maksimum sekitar 14,5%. Dengan modulus elastisitas 4,44 GPa.

### 3) Spesimen UT120V3



Gambar 4. 5 Grafik Pengujian Tarik Spesimen UT120V3

Tabel 4. 5 Regangan -Tegangan Spesimen UT120V3

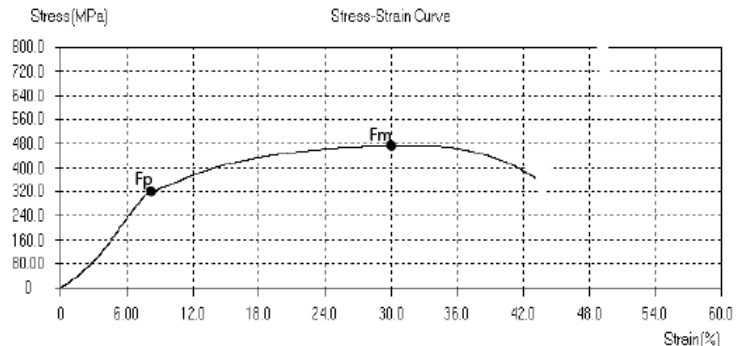
Parameter	Nilai
Fp	340 MPa
Fm	485 MPa
FeH	370 MPa
FeL	350 MPa
Elastis Limit	410 MPa
Strain Max	48,5%

Perhitungan modulus elastisitas:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{340 - 0}{0,11 - 0} = 3090,9 \text{ MPa} = 3,1 \text{ GPa}$$

Grafik stress-strain UT120V3 menunjukkan bahwa material awalnya mengalami kenaikan tegangan linear dalam zona elastis hingga mencapai batas proporsional pada Fp 340 MPa, kemudian memasuki zona plastis dengan tegangan luluh atas FeH 370 MPa dan luluh bawah FeL 350 MPa, sebelum mencapai tegangan maksimum Fm 485 MPa; regangan maksimum sebelum menurun adalah sekitar 48,5%. Dengan modulus elastisitas 3,1 GPa

### 4) Spesimen UT120V4



Gambar 4. 6 Grafik Pengujian Tarik Spesimen UT120V4

Tabel 4. 6 Regangan - Tegangan Spesimen UT120V4

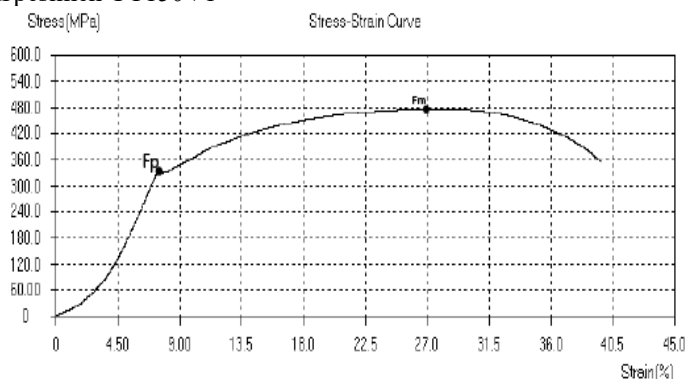
Parameter	Nilai
Fp	320 MPa
Fm	475 MPa
FeH	335 MPa
FeL	330 MPa
Elastis Limit	410 MPa
Strain Max	54%

Perhitungan modulus elastisitas UT120V4:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{320 - 0}{0,06 - 0} = 5333 \text{ MPa} = 5,33 \text{ GPa}$$

Grafik stress-strain UT120V4 menunjukkan material yang awalnya meningkat tegangan secara linear dalam zona elastis hingga batas proporsional Fp 320 MPa, kemudian memasuki zona plastis dengan tegangan luluh atas FeH 335 MPa dan luluh bawah FeL 380 MPa, mencapai tegangan maksimum Fm 475 MPa, dengan regangan maksimum 54% sebelum menurun akibat necking. Dengan modulus elastisitas 5,33 GPa

#### 5) Spesimen UT150V1



Gambar 4. 7 Grafik Pengujian Tarik Spesimen UT150V1

Tabel 4. 7 Regangan - Tegangan Spesimen UT150V1

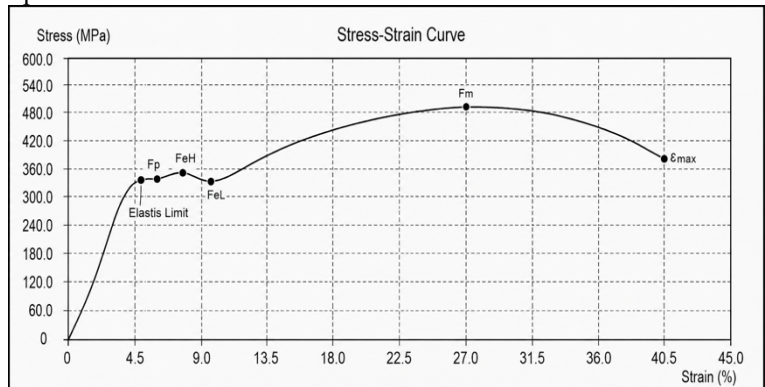
Parameter	Nilai
Fp	330 MPa
Fm	480 MPa
FeH	340 MPa
FeL	325 MPa
Elastis Limit	330 MPa
Strain Max	40%

Perhitungan modulus elastisitas spesimen UT150V1:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{330 - 0}{0,068 - 0} = 4853 \text{ MPa} = 4,85 \text{ GPa}$$

Grafik menunjukkan hubungan tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) dari material yang diuji tarik. Dari grafik dapat diperoleh beberapa parameter penting; batas proporsional atau batas elastis ( $F_p$ ) sekitar 330 MPa pada *strain* 6,8%, menunjukkan awal deformasi plastis. Tegangan maksimum ( $F_m$ ) tercapai sekitar 475–480 MPa pada *strain* 27%, menandai kekuatan tarik material. Batas luluh atas ( $F_{eH}$ ) dan batas luluh bawah ( $F_{eL}$ ) diperkirakan masing-masing sekitar 335 MPa dan 320 MPa. Material mengalami *strain* maksimum sekitar 39–40% sebelum putus, menunjukkan kemampuan deformasi plastis yang signifikan. Modulus elastisitas material, dihitung dari kemiringan awal kurva elastis, diperkirakan sekitar 4,85 GPa, menandakan kekakuan material pada daerah elastis.

#### 6) Spesimen UT150V2



Gambar 4. 8 Grafik Pengujian Tarik Spesimen UT150V2

Tabel 4. 8 Regangan - Tegangan Spesimen UT150V2

Parameter	Nilai
$F_p$	340 MPa
$F_m$	489 MPa
$F_{eH}$	355 MPa
$F_{eL}$	335 MPa
Elastis Limit	340 MPa
Strain Max	40,5%

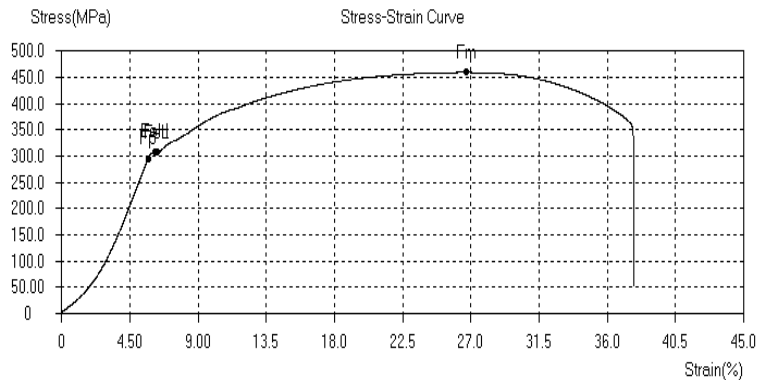
Perhitungan modulus elastisitas spesimen UT150V2:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{340 - 0}{0,045 - 0} = 7555,56 \text{ MPa} = 7,56 \text{ GPa}$$

Grafik tersebut menunjukkan kurva tegangan–regangan material hasil pengujian tarik. Pada awal pembebanan, tegangan meningkat tajam seiring bertambahnya regangan, yang menunjukkan daerah elastis material. Setelah melewati batas

elastis, kurva mulai memasuki daerah luluh yang ditandai oleh titik  $F_p$ ,  $F_eH$ , dan  $F_eL$ . Selanjutnya, tegangan kembali meningkat akibat proses pengerasan regangan hingga mencapai tegangan maksimum  $F_m$  sekitar 489 MPa pada regangan sekitar 27%. Setelah titik maksimum, kurva mengalami penurunan tegangan hingga mencapai regangan maksimum sekitar 40,5%, yang menunjukkan kemampuan deformasi material sebelum mengalami putus dan mendapatkan nilai modulus elastisitas sebesar 7,56 GPa.

7) Spesimen UT150V3



Gambar 4. 9 Grafik Pengujian Tarik Spesimen UT150V3

Tabel 4. 9 Regangan - Tegangan Spesimen UT150V3

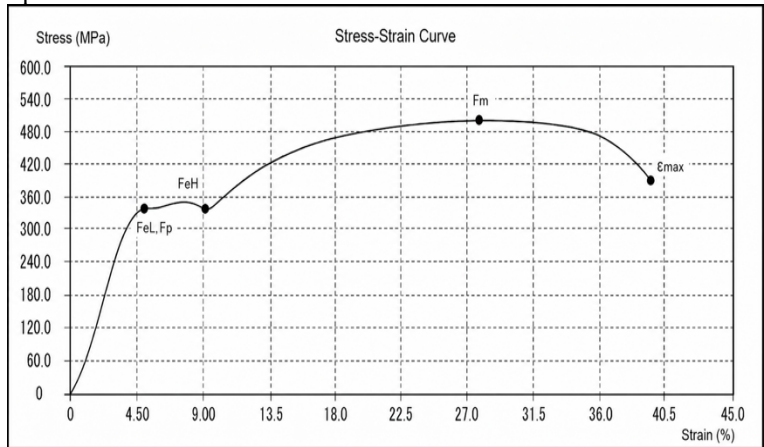
Parameter	Nilai
$F_p$	320 MPa
$F_m$	475 MPa
$F_eH$	330 MPa
$F_eL$	315 MPa
Elastis Limit	320 MPa
Strain Max	40%

Perhitungan modulus elastisitas spesimen UT150V3:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{320 - 0}{0,048 - 0} = 6667 \text{ MPa} = 6,7 \text{ GPa}$$

Grafik menunjukkan perilaku tarik material hingga putus. Batas elastis dan proporsional ( $F_p$ ) tercapai sekitar 320 MPa pada *strain* 4,8–5%, menunjukkan awal deformasi plastis. Tegangan maksimum ( $F_m$ ) mencapai 475 MPa pada *strain* 27%, menandai kekuatan tarik puncak. Batas luluh atas ( $F_eH$ ) dan bawah ( $F_eL$ ) masing-masing sekitar 325 MPa dan 310 MPa. Material mengalami deformasi maksimum hingga *strain* 39–40% sebelum putus. Modulus elastisitas material diperkirakan sekitar 6,7 GPa, menunjukkan kekakuan pada daerah elastis.

8) Spesimen UT150V4



Gambar 4. 10 Grafik Pengujian Tarik Spesimen UT150V4

Tabel 4. 10 Regangan - Tegangan Spesimen UT150V4

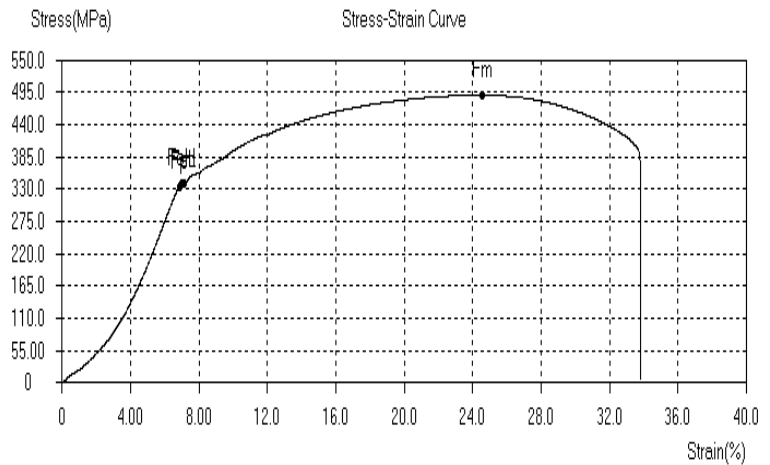
Parameter	Nilai
Fp	335 MPa
Fm	495 MPa
FeH	345 MPa
FeL	335 MPa
Elastis Limit	334 MPa
Strain Max	38%

Perhitungan modulus elastisitas spesimen UT150V4:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{335 - 0}{0,045 - 0} = 7444 \text{ MPa} = 7,44 \text{ GPa}$$

Grafik tegangan-regangan spesimen UT150V4 menunjukkan perilaku material saat menerima beban tarik. Pada tahap awal, tegangan meningkat tajam seiring bertambahnya regangan, yang menandakan material masih berada pada daerah elastis. Titik FeL dan Fp berada pada tegangan sekitar 335 MPa, yang menunjukkan awal terjadinya luluh pada material. Setelah itu, kurva sedikit meningkat menuju titik FeH sekitar 345 MPa, kemudian material mengalami pengerasan regangan hingga mencapai tegangan maksimum Fm sebesar 495 MPa. Setelah melewati tegangan maksimum, kurva menurun hingga mencapai titik emax, yang menunjukkan regangan maksimum material sebelum mengalami kegagalan atau patah. Nilai modulus elastisitas sebesar 7,44 GPa menunjukkan bahwa material memiliki kemampuan menahan deformasi elastis sebelum mengalami perubahan bentuk permanen.

9) Spesimen UT120X1



Gambar 4. 11 Grafik Hasil Pengujian Tarik Spesimen UT120X1

Tabel 4. 11 Tegangan - Regangan Spesimen UT120X1

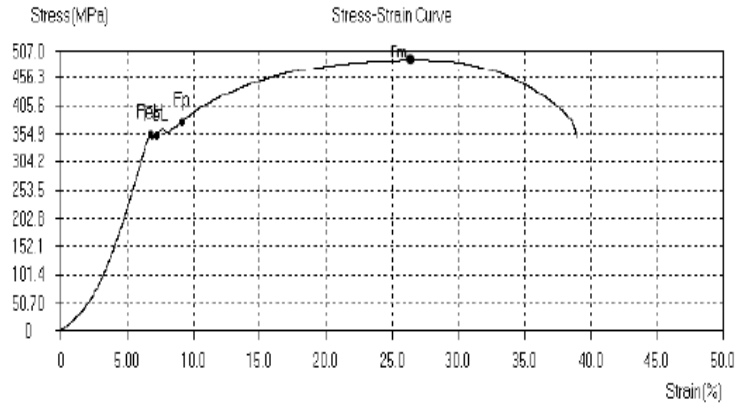
Parameter	Nilai
Fp	340 MPa
Fm	495 MPa
FeH	340 MPa
FeL	320 MPa
Elastis Limit	340 MPa
Strain Max	37%

Perhitungan modulus elastisitas spesimen UT120X1:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{340 - 0}{0,07 - 0} = 4857 \text{ MPa} = 4,86 \text{ GPa}$$

Grafik menunjukkan perilaku tarik material hingga putus. Batas elastis dan proporsional (Fp) tercapai sekitar 340 MPa pada *strain* 7%, menandai awal deformasi plastis. Tegangan maksimum (Fm) mencapai 500 MPa pada *strain* 24–25%, menunjukkan kekuatan tarik puncak material. Batas luluh atas (FeH) dan bawah (FeL) masing-masing diperkirakan sekitar 340 MPa dan 320 MPa. Material mengalami deformasi maksimum hingga *strain* 36–37% sebelum putus. Modulus elastisitas diperkirakan sekitar 4,86 GPa, menandakan kekakuan material pada daerah elastis.

## 10) Spesimen UT120X2



Gambar 4. 12 Grafik Pengujian Tarik Spesimen UT120X2

Tabel 4. 12 Tegangan - Regangan Spesimen UT120X2

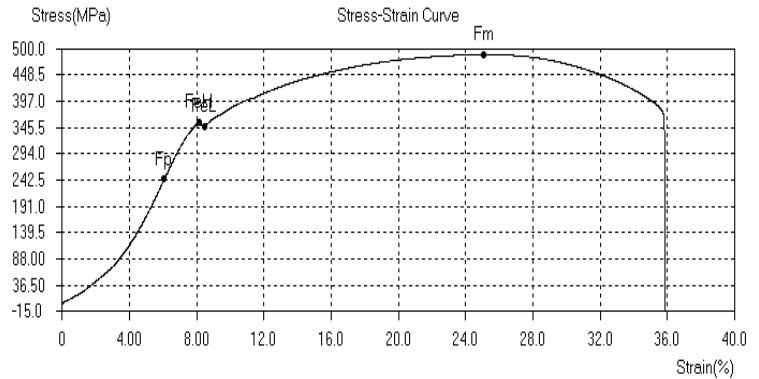
Parameter	Nilai
Fp	360 MPa
Fm	505 MPa
FeH	360 MPa
FeL	350 MPa
Elastis Limit	360 MPa
Strain Max	39%

Perhitungan Modulus:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{360 - 0}{0,08 - 0} = 4500 \text{ MPa} = 4,5 \text{ GPa}$$

Grafik menunjukkan perilaku tarik material hingga putus. Batas elastis dan proporsional (Fp) tercapai sekitar 360 MPa pada *strain* 8%, menandai awal deformasi plastis. Tegangan maksimum (Fm) mencapai 505 MPa pada *strain* 26–27%, menunjukkan kekuatan tarik puncak material. Batas luluh atas (FeH) dan bawah (FeL) masing-masing sekitar 360 MPa dan 345–350 MPa. Material mengalami deformasi maksimum hingga *strain* 40–41% sebelum putus. Modulus elastisitas diperkirakan sekitar 4,5 GPa, menunjukkan kekakuan material pada daerah elastis.

## 11) Spesimen UT120X3



Gambar 4. 13 Grafik Pengujian Tarik Spesimen UT120X3

Tabel 4. 13 Regangan - Tegangan Spesimen UT120X3

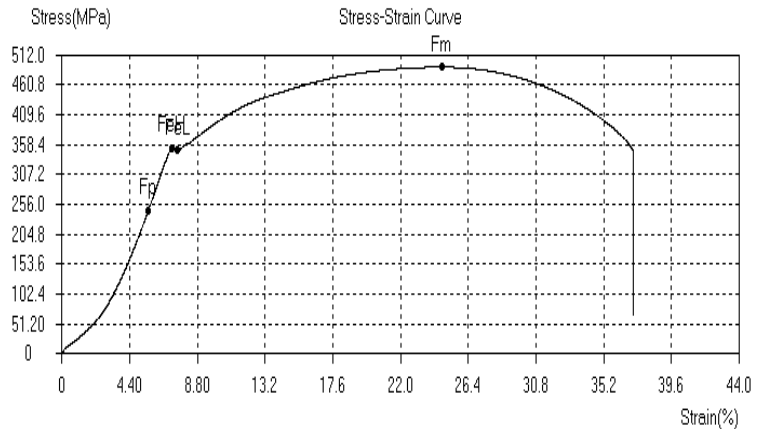
Parameter	Nilai
Fp	243 MPa
Fm	496 MPa
FeH	348 MPa
FeL	345MPa
Elastis Limit	348 MPa
Strain Max	35,8%

Perhitungan modulus elastisitas spesimen UT120X3:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{243 - 0}{0,06 - 0} = 4050 \text{ MPa} = 4,05 \text{ GPa}$$

Grafik tegangan-regangan pada spesimen UT120X3 menunjukkan bahwa material mengalami peningkatan tegangan secara cepat pada tahap awal hingga memasuki daerah luluh yang ditandai oleh titik Fp dan FeL. Setelah melewati daerah luluh, tegangan terus meningkat akibat pengerasan regangan hingga mencapai tegangan maksimum Fm sekitar 480–500 MPa pada regangan sekitar 25%. Setelah titik maksimum, kurva mulai menurun yang menandakan material memasuki tahap deformasi plastis lanjut hingga mendekati patah. Dengan regangan maksimum sekitar 36%, material ini menunjukkan sifat cukup ulet karena mampu mengalami deformasi yang besar sebelum mengalami kegagalan.

## 12) Spesimen UT120X4



Gambar 4. 14 Grafik Pengujian Tarik Spesimen UT120X4

Tabel 4. 14 Tegangan - Regangan Spesimen UT120X4

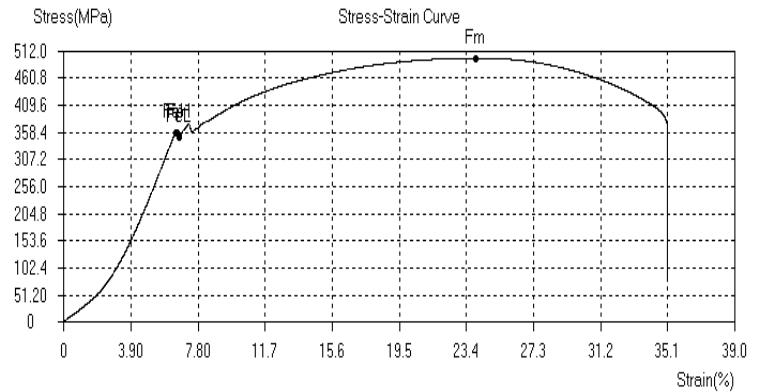
Parameter	Nilai
Fp	250 MPa
Fm	492 MPa
FeH	352 MPa
FeL	348 MPa
Elastis Limit	250 MPa
Strain Max	37%

Perhitungan modulus elastisitas spesimen UT120X4

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{250 - 0}{0,056 - 0} = 4464 \text{ MPa} = 4,46 \text{ GPa}$$

Grafik tegangan-regangan spesimen UT120X4 menunjukkan bahwa material mengalami peningkatan tegangan cukup tajam pada tahap awal pembebanan, yang menandakan material berada pada daerah elastis. Berdasarkan hasil perhitungan, nilai modulus elastisitas material diperoleh sekitar 4.464 MPa atau 4,46 GPa, sehingga material memiliki kemampuan menahan deformasi elastis sebelum memasuki perubahan bentuk permanen. Setelah melewati daerah elastis, material mulai memasuki daerah luluh yang ditandai oleh titik Fp dan FeL, kemudian tegangan terus meningkat akibat pengerasan regangan hingga mencapai tegangan maksimum Fm sekitar 492 MPa pada regangan sekitar 24–25%. Setelah mencapai tegangan maksimum, kurva mengalami penurunan yang menunjukkan material mulai memasuki deformasi plastis lanjut hingga mendekati patah. Secara umum, grafik ini memperlihatkan bahwa material memiliki kekuatan tarik cukup tinggi dan kemampuan deformasi yang baik sebelum mengalami kegagalan.

### 13) Spesimen UT150X1



Gambar 4. 15 Grafik Hasil Pengujian Tarik Spesimen UT150X1

Tabel 4. 15 Regangan - Tegangan Spesimen UT150X1

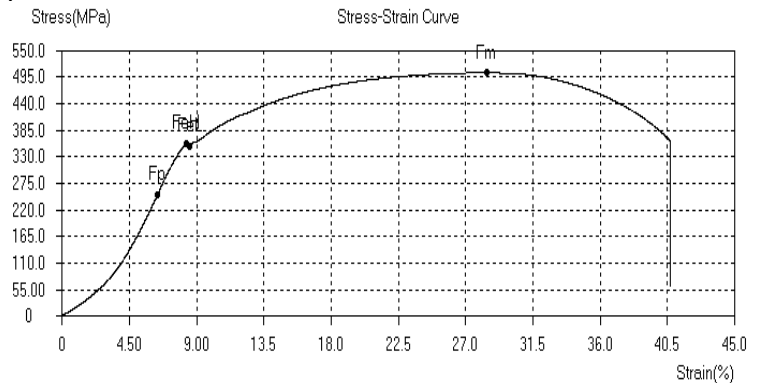
Parameter	Nilai
Fp	350 MPa
Fm	495 MPa
FeH	360 MPa
FeL	350 MPa
Elastis Limit	350 MPa
Strain Max	35,1%

Perhitungan modulus elastisitas spesimen UT150X1:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{350 - 0}{0,067 - 0} = 5223,88 \text{ MPa} = 5,22 \text{ GPa}$$

Grafik tegangan–regangan tersebut menunjukkan bahwa material mengalami peningkatan tegangan secara cepat pada daerah awal pembebanan hingga mencapai titik Fp/FeL sekitar 350 MPa pada regangan sekitar 6,7%. Setelah melewati daerah luluh, tegangan terus meningkat secara bertahap akibat proses pengerasan regangan hingga mencapai tegangan maksimum Fm sekitar 495 MPa pada regangan sekitar 23,6%. Setelah titik maksimum, kurva mulai menurun yang menandakan material memasuki deformasi plastis lanjut sebelum mengalami kegagalan. Berdasarkan grafik, material memiliki sifat cukup ulet karena mampu mengalami regangan hingga sekitar 35,1%, dengan nilai modulus elastisitas estimasi sebesar 5,223 MPa atau 5,22 GPa.

#### 14) Spesimen UT150X2



Gambar 4. 16 Grafik Hasil Pengujian Tarik Spesimen UT150X2

Tabel 4. 16 Tegangan - Regangan Spesimen UT150X2

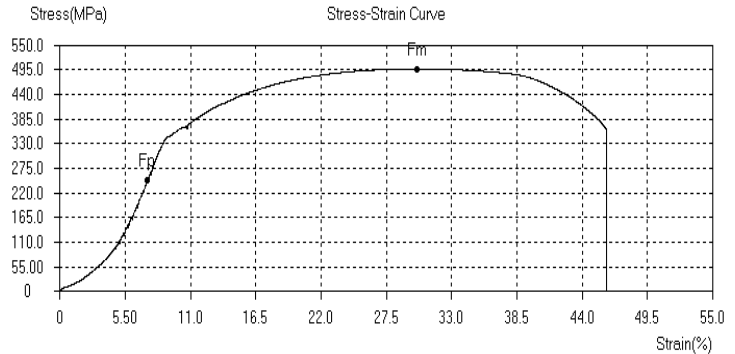
Parameter	Nilai
Fp	260 MPa
Fm	500 MPa
FeH	350 MPa
FeL	345 MPa
Elastis Limit	260 MPa
Strain Max	40,5%

Perhitungan modulus elastisitas spesimen UT150X2:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{260 - 0}{0,062 - 0} = 4193,55 \text{ MPa} = 4,19 \text{ GPa}$$

Grafik tegangan-regangan spesimen UT150X2 menunjukkan bahwa material mengalami peningkatan tegangan cukup tajam pada tahap awal pembebanan hingga mencapai titik Fp sekitar 260 MPa. Setelah itu, material memasuki daerah luluh yang ditandai oleh titik FeH/FeL pada kisaran tegangan sekitar 350 MPa. Tegangan kemudian terus meningkat akibat pengerasan regangan hingga mencapai tegangan maksimum Fm sekitar 500 MPa pada regangan sekitar 28%. Setelah melewati titik maksimum, kurva mulai menurun yang menunjukkan material mengalami deformasi plastis lanjut hingga mendekati patah pada regangan sekitar 40,5%. Berdasarkan nilai modulus elastisitas sebesar 4,19 GPa, material memiliki kemampuan elastis awal yang dapat dihitung dari kemiringan kurva pada daerah awal pembebanan.

## 15) Spesimen UT150X3



Gambar 4. 17 Grafik Hasil Pengujian Tarik Spesimen UT150X3

Tabel 4. 17 Tegangan - Regangan Spesimen UT150X3

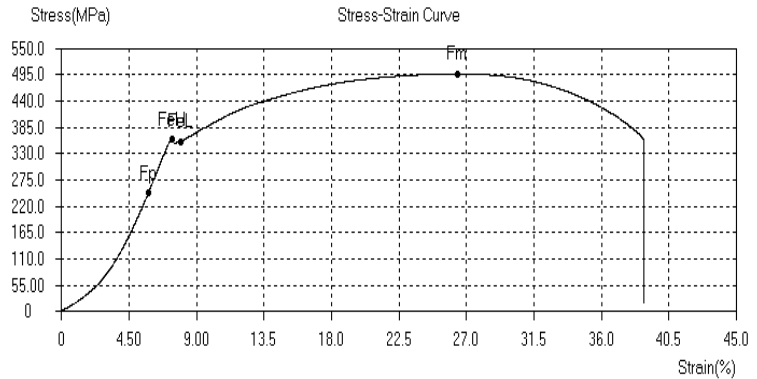
Parameter	Nilai
Fp	260 MPa
Fm	495 MPa
FeH	380 MPa
FeL	370 MPa
Elastis Limit	260 MPa
Strain Max	46%

Perhitungan modulus elastisitas spesimen UT150X3:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{260 - 0}{0,072 - 0} = 3611,11 \text{ MPa} = 3,61 \text{ GPa}$$

Grafik tegangan regangan spesimen UT150X3 menunjukkan perilaku material selama pengujian tarik, di mana tegangan meningkat secara tajam pada tahap awal pembebanan hingga mencapai titik luluh  $F_p$  pada 260 MPa. Setelah memasuki daerah plastis, material mengalami pengerasan regangan (*strain hardening*) sehingga tegangan terus meningkat sampai mencapai tegangan maksimum  $F_m$  sekitar 495 MPa pada regangan sekitar 30%. Setelah mencapai titik maksimum, kurva mulai menurun yang menandakan material mengalami deformasi plastis lanjut hingga mendekati kegagalan. Material mampu mengalami regangan yang cukup besar, mencapai sekitar 45%, sehingga menunjukkan sifat keuletan (*ductility*) yang baik sebelum mengalami patah.

## 16) Spesimen UT150X4



Gambar 4. 18 Grafik Hasil Pengujian Tarik Spesimen UT150X4

Tabel 4. 18 Regangan - Tegangan Spesimen UT150X4

Parameter	Nilai
Fp	260 MPa
Fm	495 MPa
FeH	360 MPa
FeL	350 MPa
Elastis Limit	260 MPa
Strain Max	40%

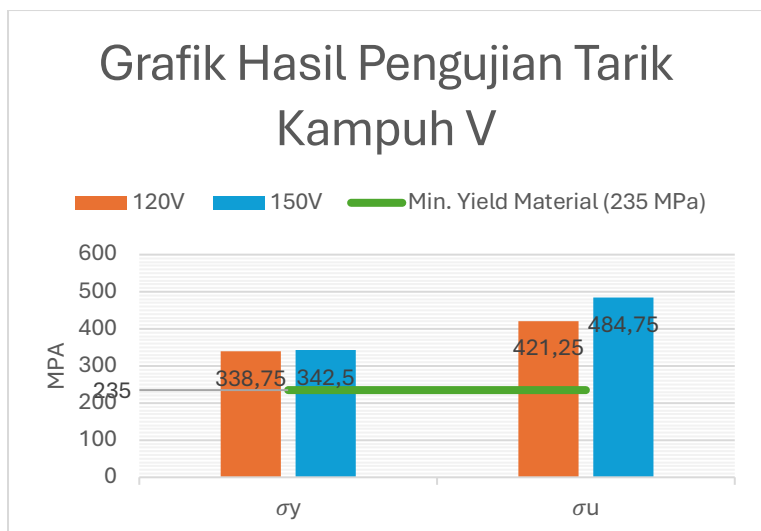
Perhitungan modulus elastisitas spesimen UT150X4:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{260 - 0}{0,062 - 0} = 4193,55 \text{ MPa} = 4,19 \text{ GPa}$$

Grafik tegangan–regangan tersebut menunjukkan perilaku material selama pengujian tarik, di mana tegangan meningkat secara cepat pada tahap awal pembebanan hingga mencapai titik luluh Fp 260 MPa. Setelah melewati daerah luluh, material memasuki fase deformasi plastis yang ditandai oleh titik FeL pada kisaran 350 MPa, kemudian mengalami pengerasan regangan (*strain hardening*) sehingga tegangan terus meningkat sampai mencapai tegangan maksimum Fm sekitar 495 MPa pada regangan sekitar 26,8%. Setelah mencapai tegangan maksimum, kurva mulai mengalami penurunan yang menunjukkan terjadinya deformasi plastis lanjut hingga mendekati patah. Material masih mampu mengalami regangan yang relatif tinggi hingga sekitar 39%, yang mengindikasikan bahwa material memiliki sifat keuletan (*ductility*) yang baik serta kemampuan deformasi yang cukup besar sebelum mengalami kegagalan.

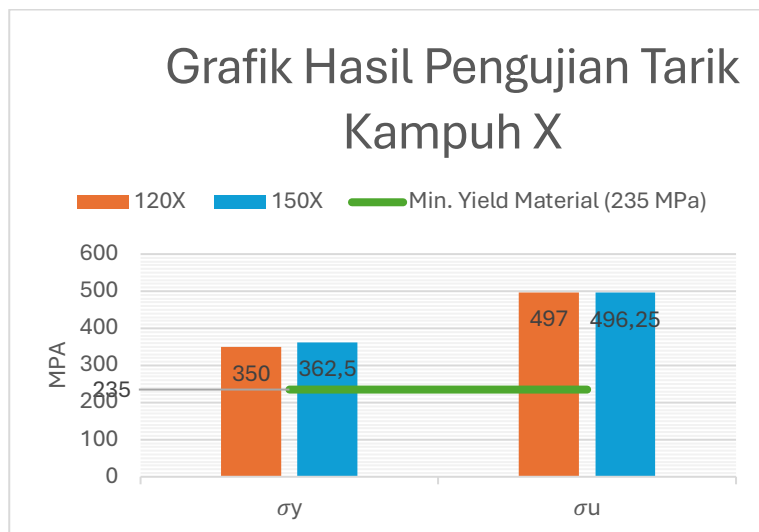
Tabel 4. 19 Hasil Pengujian Tarik

Spesimen		Parameter		
		$\sigma_u$	$\sigma_y$	Modulus Elastisitas
UT120V	1	370	340	5,605 GPa
	2	355	330	
	3	485	480	
	4	475	400	
	Rata-rata	421,25	387,5	
UT150V	1	480	340	6,637 GPa
	2	489	355	
	3	475	330	
	4	495	345	
	Rata-rata	484,75	342,5	
UT120X	1	495	340	4,467 GPa
	2	505	360	
	3	496	348	
	4	492	352	
	Rata-rata	497	350	
UT150X	1	495	360	4,302 GPa
	2	500	350	
	3	495	380	
	4	495	360	
	Rata-rata	496,25	362,5	



Gambar 4. 19 Diagram Hasil Pengujian Tarik Kampuh V

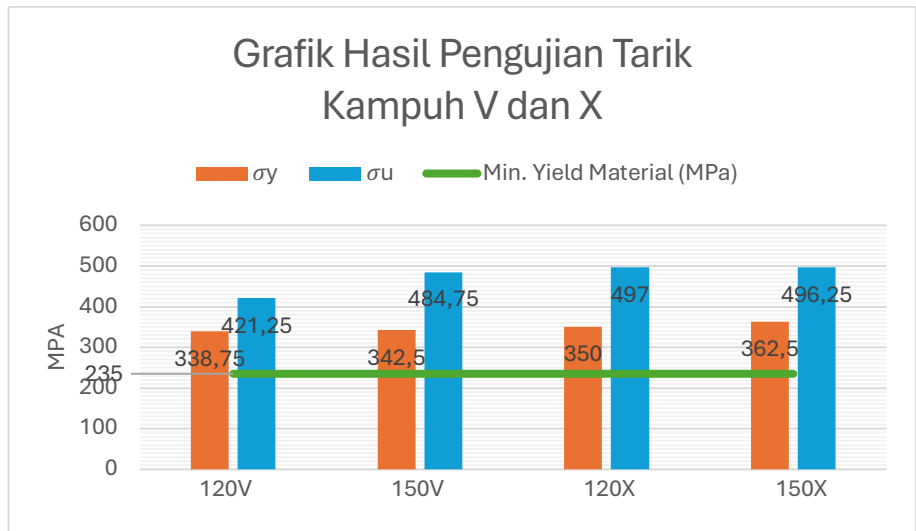
Berdasarkan grafik hasil pengujian tarik kampuh V dengan variasi arus pengelasan 120A dan 150A, diperoleh nilai tegangan tarik maksimum ( $\sigma_u$ ) sebesar 421,25 MPa dan 484,75 MPa serta nilai tegangan luluh ( $\sigma_y$ ) sebesar 387,5 MPa dan 342,5 MPa secara berurutan, yang mana kedua nilai  $\sigma_y$  tersebut masih berada jauh di atas batas minimum *yield* material sebesar 235 MPa sehingga dapat dikategorikan aman, sementara selisih hasil yang tidak signifikan antara kedua variasi arus tersebut mengindikasikan bahwa perbedaan besar arus pada rentang tersebut tidak memberikan pengaruh yang berarti terhadap kekuatan sambungan kampuh V yang dihasilkan, meskipun penggunaan arus yang lebih besar (150A) berpotensi meningkatkan kecepatan proses pengelasan akibat *heat input* yang lebih tinggi, sehingga kedua parameter arus tersebut dapat dipertimbangkan sebagai alternatif yang layak dalam aplikasi nyata pengelasan kampuh V pada proses penyambungan pelat lambung kapal dengan tetap memperhatikan efisiensi waktu produksi.



Gambar 4. 20 Diagram Hasil Pengujian Tarik Kampuh X

Berdasarkan grafik hasil pengujian tarik kampuh X dengan variasi arus pengelasan 120A dan 150A, diperoleh nilai tegangan tarik maksimum ( $\sigma_u$ ) sebesar 497 MPa dan 496,25 MPa serta nilai tegangan luluh ( $\sigma_y$ ) sebesar 350 MPa dan 362,5 MPa secara berurutan, yang mana kedua nilai  $\sigma_y$  tersebut masih berada jauh di atas batas minimum *yield* material sebesar 235 MPa sehingga sambungan dapat dikategorikan memenuhi syarat keamanan material, sementara selisih hasil yang relatif tidak signifikan antara kedua variasi arus tersebut mengindikasikan bahwa perbedaan besar arus pada rentang tersebut tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan sambungan kampuh X yang dihasilkan, meskipun penggunaan arus yang lebih besar (150A) secara teoritis berpotensi meningkatkan kecepatan proses pengelasan akibat *heat input* yang lebih tinggi, sehingga kedua parameter arus tersebut dapat

dipertimbangkan sebagai alternatif yang layak diaplikasikan dalam proses pengelasan kampuh X pada penyambungan pelat lambung kapal dengan tetap memperhatikan aspek efisiensi waktu produksi.



Gambar 4. 21 Hasil Rata-Rata Pengujian Tarik Kampuh V dan X

Berdasarkan grafik perbandingan hasil pengujian tarik kampuh V dan kampuh X dengan variasi arus pengelasan 120A dan 150A, diperoleh nilai tegangan tarik maksimum ( $F_m/\sigma_u$ ) berturut-turut sebesar 421,25 MPa (120V), 484,75 MPa (150V), 497 MPa (120X), dan 496,25 MPa (150X), serta nilai tegangan luluh ( $F_eH/\sigma_y$ ) berturut-turut sebesar 387,5 MPa (120V), 342,5 MPa (150V), 350 MPa (120X), dan 362,5 MPa (150X), yang mana seluruh nilai  $\sigma_y$  pada kedua jenis kampuh tersebut masih berada di atas batas minimum *yield* material sebesar 235 MPa, sehingga kedua jenis kampuh dapat dikategorikan aman dan masih layak untuk diaplikasikan dalam proses pengelasan.

Dari segi kekuatan yang diperoleh, kampuh X secara umum menunjukkan nilai tegangan tarik maksimum yang lebih tinggi dan relatif konsisten pada kedua variasi arus (497 MPa dan 496,25 MPa) dibandingkan kampuh V yang menunjukkan perbedaan nilai cukup besar antara kedua variasi arus (421,25 MPa dan 484,75 MPa), sehingga kampuh X dapat dikatakan memberikan kekuatan tarik yang lebih stabil terhadap perubahan arus pengelasan. Hal ini erat kaitannya dengan proses pengelasannya, di mana kampuh V hanya dilakukan pengelasan pada satu sisi, sedangkan kampuh X dilakukan pengelasan pada dua sisi, sehingga penetrasi dan kekuatan sambungan yang dihasilkan oleh kampuh X relatif lebih merata dan lebih tinggi dibandingkan kampuh V.

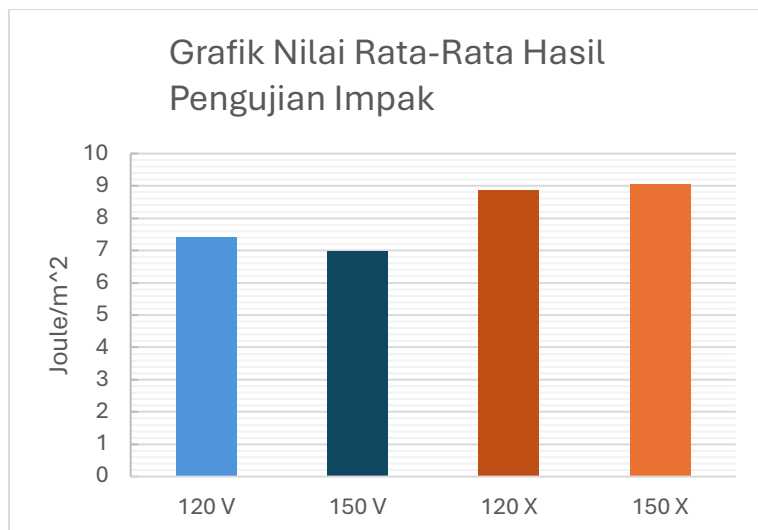
Dipandang dari sisi efisiensi produksi kapal, kampuh V umumnya lebih unggul karena memiliki sudut kampuh yang lebih kecil serta hanya membutuhkan pengelasan satu sisi, sehingga jumlah pass pengelasan dan logam pengisi yang digunakan lebih sedikit dibandingkan kampuh X yang memerlukan pengelasan dua sisi, sehingga proses pengelasan dapat

berlangsung lebih cepat dan ekonomis. Dengan demikian, kampuh V dapat dipertimbangkan sebagai pilihan yang lebih efisien untuk diaplikasikan secara masif dalam proses penyambungan pelat lambung kapal, tanpa mengabaikan bahwa kampuh X tetap menjadi alternatif yang baik pada bagian-bagian konstruksi yang menuntut kekuatan tarik lebih tinggi dan penetrasi yang lebih sempurna.

#### 4.2.2 Hasil Pengujian Impak

Tabel 4. 20 Hasil Pengujian Impak

Nama Spesimen	Lebar (mm)	Tinggi (mm)	Energi (Joule)	Harga Impak (Joule/mm <sup>2</sup> )
120V	1	10	147	1,4107
	2	10	136	1,36
	3	10	200	2
	4	10	258	2,58
120X	1	10	124	1,24
	2	10	242	2,42
	3	10	176	1,76
	4	10	157	1,57
150V	1	10	148	1,48
	2	10	291	2,91
	3	10	298	2,98
	4	10	149	1,49
150X	1	10	193	1,93
	2	10	244	2,44
	3	10	289	2,89
	4	10	181	1,81



Gambar 4. 22 Diagram Hasil Pengujian Impak

Berdasarkan grafik nilai rata-rata hasil pengujian impact pada empat variasi spesimen, yaitu 120V, 150V, 120X, dan 150X, diperoleh nilai rata-rata sebesar 7,38 Joule/mm<sup>2</sup> pada variasi 120V, 6,93 Joule/mm<sup>2</sup> pada variasi 150V, 8,85 Joule/mm<sup>2</sup> pada variasi 120X, dan 9,07 Joule/mm<sup>2</sup> pada variasi 150X, yang menunjukkan bahwa secara keseluruhan kampuh X (120X dan 150X) memiliki nilai rata-rata ketahanan impact yang lebih tinggi dibandingkan kampuh V (120V dan 150V), sementara apabila ditinjau dari pengaruh besar arus, pada kampuh V terjadi penurunan nilai rata-rata ketahanan impact seiring peningkatan arus dari 120A ke 150A, sebaliknya pada kampuh X nilai rata-rata justru mengalami sedikit peningkatan seiring peningkatan arus dari 120A ke 150A.

Perbedaan jenis kampuh tersebut memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap hasil pengujian impact, di mana kampuh X yang dilas pada dua sisi menghasilkan struktur lasan dengan penetrasi yang lebih merata dan distribusi tegangan sisa yang lebih seimbang, sehingga lebih mampu menyerap energi benturan dibandingkan kampuh V yang hanya dilas pada satu sisi. Sementara itu, variasi arus pengelasan (120A dan 150A) memberikan pengaruh yang relatif kecil dan tidak konsisten terhadap nilai ketahanan impact, di mana kenaikan arus pada kampuh V justru menurunkan nilai ketahanan impact, sedangkan pada kampuh X kenaikan arus memberikan peningkatan yang tidak terlalu signifikan, sehingga dapat disimpulkan bahwa jenis kampuh memberikan pengaruh yang lebih dominan terhadap hasil ketahanan impact dibandingkan variasi besar arus yang digunakan dalam proses pengelasan

#### **4.2.3 Perhitungan Standar Deviasi menggunakan Python™**

Dalam penelitian ini, pengujian tarik dan pengujian impact dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik material berdasarkan beberapa kali pengulangan pengujian. Setiap spesimen yang diuji dapat menghasilkan nilai yang berbeda meskipun berasal dari material dan perlakuan yang sama. Perbedaan tersebut dapat dipengaruhi oleh variasi kondisi spesimen, ketelitian proses pengujian, kondisi alat uji, serta kemungkinan adanya ketidakhomogenan struktur material. Oleh karena itu, hasil pengujian tidak hanya dianalisis berdasarkan nilai rata-rata, tetapi juga perlu dilihat tingkat penyebaran datanya.

Salah satu cara untuk mengetahui tingkat penyebaran data hasil pengujian adalah dengan menghitung standar deviasi. Standar deviasi digunakan untuk menunjukkan seberapa jauh nilai hasil pengujian menyimpang dari nilai rata-ratanya. Semakin kecil nilai standar deviasi, maka data hasil pengujian semakin seragam dan menunjukkan tingkat konsistensi yang baik. Sebaliknya, semakin besar nilai standar deviasi, maka variasi antar spesimen semakin tinggi sehingga hasil pengujian perlu dianalisis lebih lanjut. Pada pengujian tarik, standar deviasi digunakan untuk melihat konsistensi nilai sifat mekanik seperti tegangan tarik maksimum, regangan, atau modulus elastisitas dari setiap spesimen. Sementara itu, pada pengujian impact, standar deviasi digunakan untuk mengetahui variasi nilai energi serap atau ketangguhan impact yang diperoleh dari masing-masing spesimen. Dengan adanya perhitungan standar deviasi, analisis hasil pengujian menjadi lebih objektif karena tidak

hanya menampilkan nilai rata-rata, tetapi juga menggambarkan tingkat kestabilan dan keandalan data pengujian.

Pada penelitian ini, perhitungan standar deviasi dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Python. Penggunaan Python bertujuan untuk mempermudah proses pengolahan data hasil pengujian tarik dan impak, terutama ketika data yang dianalisis terdiri atas beberapa spesimen. Melalui Python, nilai rata-rata dan standar deviasi dapat dihitung secara lebih cepat, sistematis, dan meminimalkan kesalahan perhitungan manual. Perhitungan standar deviasi menggunakan python terdapat pada **Lampiran 10**.

1) Pengujian Tarik

1. Variabel 120 V

120 V		
Nama Spesimen	$\sigma_y$	$\sigma_u$
UT120V1	340	370
UT120V2	330	355
UT120V3	350	485
UT120V4	335	475
Standar Deviasi	8,616	68,246

Validasi perhitungan nilai standar deviasi menggunakan rumus:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

s	Standar Deviasi
$x_i$	Nilai hasil pengujian ke-i
$\bar{x}$	Nilai rata-rata
n	Jumlah Spesimen
n-1	Nilai kebebasan untuk data sampel

Perhitungan rata rata:

a) Nilai sy:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{340 + 330 + 480 + 400}{4}$$

$$\bar{x} = \frac{1550}{4}$$

$$\bar{x} = 387,5$$

Perhitungan selisih dari rata – rata:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

selisih dari rata - rata:

$x_i$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
340	1,25	1,5625
330	-8,75	76,5625
350	11,25	126,5625
335	-3,75	14,0625

Perhitungan standar deviasi:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$$s = \sqrt{\frac{218,75}{4 - 1}}$$

$$s = 8,616$$

b) Nilai  $\sigma_u$ :

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{370 + 355 + 485 + 475}{4}$$

$$\bar{x} = \frac{1685}{4}$$

$$\bar{x} = 421,25$$

Perhitungan selisih dari rata – rata:

$x_i$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
370	-51,25	2626,5625
355	-66,25	4389,0625
485	63,75	4064,0625
475	53,75	2889,0625

Perhitungan standar deviasi:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$$s = \sqrt{\frac{13968,75}{4 - 1}}$$

$$s = 68,246$$

2. Variabel 150 V

150 V		
Nama Spesimen	$\sigma_y$	$\sigma_u$
UT120X1	340	480
UT120X2	355	489
UT120X3	330	475
UT120X4	345	495
Standar Deviasi	10,475	9,032

Validasi perhitungan nilai standar deviasi menggunakan rumus:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$s$	Standar Deviasi
$x_i$	Nilai hasil pengujian ke-i
$\bar{x}$	Nilai rata-rata
$n$	Jumlah Spesimen
$n-1$	Nilai kebebasan untuk data sampel

Perhitungan rata-rata:

a) Nilai  $\sigma_y$ :

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$
$$\bar{x} = \frac{340 + 355 + 330 + 345}{4}$$
$$\bar{x} = \frac{1370}{4}$$
$$\bar{x} = 342,5$$

Perhitungan selisih dari rata-rata:

$x_i$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
340	-2,5	6,25
355	12,5	156,25
330	-12,5	156,25
345	2,5	6,25

Perhitungan standar deviasi:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$
$$s = \sqrt{\frac{325}{4 - 1}}$$
$$s = 10,472$$

b) Nilai  $\sigma_u$ :

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$
$$\bar{x} = \frac{480 + 489 + 475 + 495}{4}$$
$$\bar{x} = \frac{1939}{4}$$
$$\bar{x} = 484,75$$

Perhitungan selisih dari rata-rata

$x_i$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
480	-4,75	22,5625
489	4,25	18,0625
475	-9,75	95,0625
495	10,25	105,0625

Perhitungan standar deviasi:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$
$$s = \sqrt{\frac{240,75}{4 - 1}}$$
$$s = 9,032$$

3. Variabel 120 X

120 X		
Nama Spesimen	$\sigma_y$	$\sigma_u$
UT120X1	340	495
UT120X2	360	505
UT120X3	348	496
UT120X4	352	492
Standar Deviasi	8,406	5,715

Validasi perhitungan nilai standar deviasi menggunakan rumus:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

s	Standar Deviasi
$X_i$	Nilai hasil pengujian ke-i
$\bar{X}$	Nilai rata-rata
n	Jumlah Spesimen
n-1	Derajat kebebasan untuk data sampel

Perhitungan Rata Rata:

a) Nilai  $\sigma_y$ :

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n}$$

$$\bar{X} = \frac{340 + 360 + 348 + 352}{4}$$

$$\bar{X} = \frac{1400}{4}$$

$$\bar{X} = 350$$

Perhitungan selisih dari rata-rata:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

Selisih dari nilai rata-rata:

$X_i$	$X_i - \bar{X}$	$(X_i - \bar{X})^2$
340	-10	100
360	10	100
348	-2	4
352	2	4

Perhitungan standar deviasi:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

$$s = \sqrt{\frac{208}{4 - 1}}$$

$$s = 8,406$$

b) Nilai  $\sigma_u$ :

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{495 + 505 + 496 + 492}{4}$$

$$\bar{x} = \frac{1988}{4}$$

$$\bar{x} = 497$$

Perhitungan selisih dari nilai rata-rata:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Selisih dari nilai rata-rata:

$x_i$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
495	-2	4
505	8	64
496	-1	1
492	-5	25

Perhitungan standar deviasi:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$$s = \sqrt{\frac{94}{4 - 1}}$$

$$s = 5,715$$

#### 4. Variabel 150 X

150 X		
Nama Spesimen	$\sigma_y$	$\sigma_u$
UT120X1	360	495
UT120X2	350	500
UT120X3	380	495
UT120X4	360	495
Standar Deviasi	12,635	2,753

Validasi perhitungan nilai standar deviasi menggunakan rumus:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$s$	Standar Deviasi
$x_i$	Nilai hasil pengujian ke-i
$\bar{x}$	Nilai rata-rata
$n$	Jumlah Spesimen
$n-1$	Derajat kebebasan untuk data sampel

Perhitungan rata-rata:

a) Nilai  $\sigma_y$ :

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \frac{\sum x_i}{n} \\ \bar{x} &= \frac{350 + 260 + 260 + 260}{4} \\ \bar{x} &= \frac{1130}{4} \\ \bar{x} &= 282,5\end{aligned}$$

Selisih dari nilai rata-rata:

$x_i$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
360	-2,5	6,25
350	-12,5	156,25
380	17,5	306,25
360	-2,5	6,25

Perhitungan standar deviasi:

$$\begin{aligned}s &= \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \\ s &= \sqrt{\frac{475}{4 - 1}} \\ s &= 12,635\end{aligned}$$

b) Nilai  $\sigma_u$ :

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \frac{\sum x_i}{n} \\ \bar{x} &= \frac{495 + 500 + 495 + 496}{4} \\ \bar{x} &= \frac{1985}{4} \\ \bar{x} &= 496,25\end{aligned}$$

Selisih dari nilai rata-rata:

$x_i$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
495	-1,25	1,5625
500	3,75	14,0625
495	-1,25	1,5625
495	-1,25	1,5625

Perhitungan standar deviasi:

$$\begin{aligned}s &= \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \\ s &= \sqrt{\frac{18,75}{4 - 1}} \\ s &= 2,753\end{aligned}$$

2) Pengujian Impak  
1. Variabel 120 V

Spesimen	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Luas Penampang (mm)	Energi Impak (mm)	Harga Impak (Joule/mm <sup>2</sup> )	Standar Deviasi
UI120V1	10	10	8	147	1,47	1.283
UI120V2	10	10	8	136	1,36	
UI120V3	10	10	8	200	2	
UI120V4	10	10	8	258	2,58	

Validasi perhitungan nilai standar deviasi menggunakan rumus:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

s	Standar Deviasi
$x_i$	Nilai hasil pengujian ke-i
$\bar{x}$	Nilai rata-rata
n	Jumlah Spesimen
n-1	Derajat kebebasan untuk data sampel

Perhitungan rata-rata nilai harga impact:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{1,47 + 1,36 + 2 + 2,58}{4}$$

$$\bar{x} = \frac{7,41}{4}$$

$$\bar{x} = 1,8525$$

Selisih dari nilai rata-rata:

$x_i$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
1,47	-0,3825	0,14630625
1,36	-0,4925	0,24255625
2	0,1475	0,02175625
2,58	0,7275	0,52925625

Perhitungan standar deviasi:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$$s = \sqrt{\frac{0,939875}{4 - 1}}$$

$$s = 1,283$$

2. Variabel 150 V

Spesimen	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Luas Penampang (mm)	Energi Impak (mm)	Harga Impak (Joule/ $mm^2$ )	Standar Deviasi
UI120V1	10	10	8	124	1,24	1.257
UI120V2	10	10	8	242	2,42	
UI120V3	10	10	8	176	1,76	
UI120V4	10	10	8	157	1,57	

Validasi perhitungan nilai standar deviasi menggunakan rumus:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

$s$	Standar Deviasi
$X_i$	Nilai hasil pengujian ke-i
$\bar{X}$	Nilai rata-rata
$n$	Jumlah Spesimen
$n-1$	Derajat kebebasan untuk data sampel

Perhitungan rata-rata nilai harga impact:

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n}$$

$$\bar{X} = \frac{1,24 + 2,42 + 1,76 + 1,57}{4}$$

$$\bar{X} = \frac{6,99}{4}$$

$$\bar{X} = 1,7475$$

Selisih dari nilai rata-rata:

$X_i$	$X_i - \bar{X}$	$(X_i - \bar{X})^2$
1,24	-0,5075	0,25755625
2,42	0,6725	0,45225625
1,76	0,0125	0,00015625
1,57	-0,1775	0,03150625

Perhitungan standar deviasi:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

$$s = \sqrt{\frac{0,741475}{4 - 1}}$$

$$s = 1,257$$

3. Variabel 120 X

Spesimen	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Luas Penampang (mm)	Energi Impak (mm)	Harga Impak (Joule/mm <sup>2</sup> )	Standar Deviasi
UI120V1	10	10	8	148	1,48	1.429
UI120V2	10	10	8	291	2,91	
UI120V3	10	10	8	298	2,98	
UI120V4	10	10	8	149	1,49	

Validasi perhitungan nilai standar deviasi menggunakan rumus:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

s	Standar Deviasi
$x_i$	Nilai hasil pengujian ke-i
$\bar{x}$	Nilai rata-rata
n	Jumlah Spesimen
n-1	Derajat kebebasan untuk data sampel

Perhitungan rata-rata nilai harga impact:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{1,48 + 2,91 + 2,98 + 1,49}{4}$$

$$\bar{x} = \frac{8,86}{4}$$

$$\bar{x} = 2,215$$

Selisih dari nilai rata-rata:

$x_i$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
1,48	-0,735	0,540225
2,91	0,695	0,483025
2,98	0,765	0,585225
1,49	-0,725	0,525625

Perhitungan standar deviasi:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$$s = \sqrt{\frac{2,1341}{4 - 1}}$$

$$s = 1,429$$

4. Variabel 150 X

Spesimen	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Luas Penampang (mm)	Energi Impak (mm)	Harga Impak (Joule/ $mm^2$ )	Standar Deviasi
UI120V1	10	10	8	193	1,93	1.257
UI120V2	10	10	8	244	2,44	
UI120V3	10	10	8	289	2,89	
UI120V4	10	10	8	181	1,81	

Validasi perhitungan nilai standar deviasi menggunakan rumus:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

$s$	Standar Deviasi
$X_i$	Nilai hasil pengujian ke-i
$\bar{X}$	Nilai rata-rata
$n$	Jumlah Spesimen
$n-1$	Derajat kebebasan untuk data sampel

Perhitungan rata-rata nilai harga impak:

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n}$$

$$\bar{X} = \frac{1,93 + 2,44 + 2,89 + 1,81}{4}$$

$$\bar{X} = \frac{9,07}{4}$$

$$\bar{X} = 2,2675$$

Selisih dari nilai rata-rata:

$X_i$	$X_i - \bar{X}$	$(X_i - \bar{X})^2$
1,93	-0,3375	0,11390625
2,44	0,1725	0,02975625
2,89	0,6225	0,38750625
1,81	-0,4575	0,20930625

Perhitungan standar deviasi:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

$$s = \sqrt{\frac{0,740475}{4 - 1}}$$

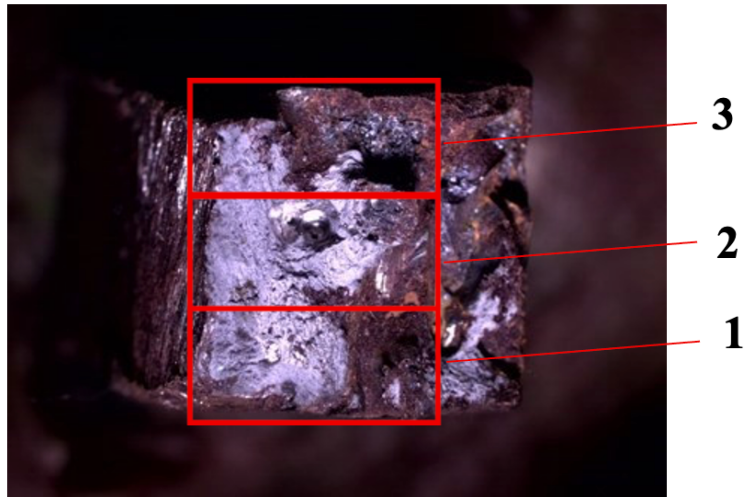
$$s = 1,257$$

3) Data hasil perhitungan Standar Deviasi

Hasil perhitungan standar deviasi pada pengujian tarik dan uji impak disajikan pada **Lampiran 11** untuk menunjukkan tingkat sebaran data terhadap nilai rata-rata yang diperoleh dari setiap spesimen. Pada pengujian tarik, standar deviasi merepresentasikan tingkat konsistensi nilai tegangan luluh dan tegangan tarik maksimum, di mana nilai yang kecil menunjukkan sifat mekanik material yang relatif homogen, sedangkan nilai yang lebih besar mengindikasikan adanya variasi kualitas sambungan las. Pada pengujian impak, standar deviasi menggambarkan tingkat keseragaman energi serap material terhadap beban kejut, sehingga semakin kecil nilainya menunjukkan ketangguhan material yang lebih stabil antar spesimen.



### 4.3 Hasil Pengamatan Struktur Makro Sambungan Las pada Spesimen Uji

#### 4.3.1 Hasil Pengamatan Struktur Makro Spesimen Uji Tarik



Gambar 4. 23 Hasil Pengujian Makrografi Spesimen Uji Tarik

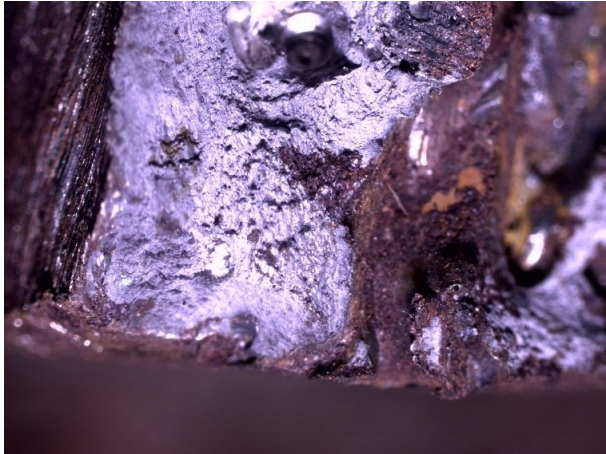
Tabel 4. 21 Pengamatan Makrografi dengan 1,2X dan 0,67X Perbesar

Area	Foto	Perbesar
		0,67X
1		1,2X

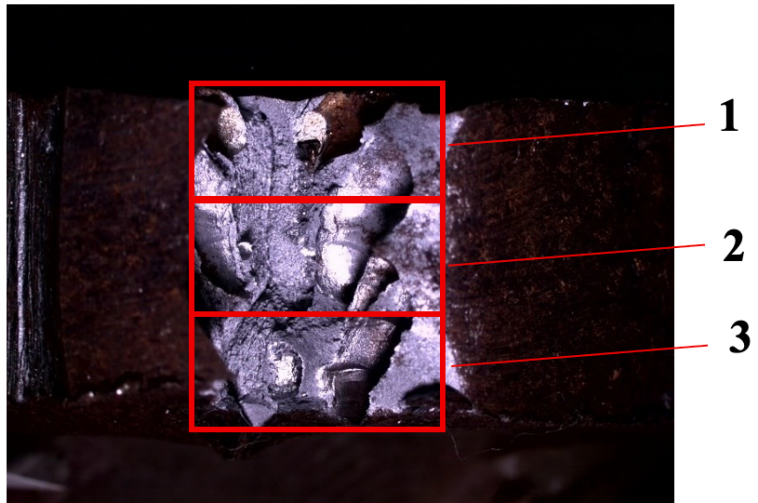
2



3





### 4.3.2 Hasil Pengamatan Struktur Makro Spesimen Uji Impak



Gambar 4. 24 Hasil Pengujian Makrografi Uji Impak

Tabel 4. 22 Pengamatan Makrografi Spesimen Uji Impak

Area	Foto	Perbesar
		0,67X

1		
2		1,2X

3		
---	---	--

#### 4.4 Pengaruh Jenis Kampuh dan Arus Pengelasan terhadap Kualitas Sambungan Mekanik dan Struktur Makro

Hasil pengujian menunjukkan bahwa jenis kampuh dan arus pengelasan memiliki pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik sambungan las serta karakteristik makro material. Pengujian tarik dilakukan untuk menilai tegangan maksimum, titik putus material, dan regangan maksimum, sedangkan pengujian impak digunakan untuk menentukan energi impak atau ketangguhan sambungan terhadap beban kejut. Data yang diperoleh menunjukkan bahwa sambungan dengan kampuh *double bevel* (X) secara konsisten memiliki performa mekanik yang lebih tinggi dibanding kampuh *single bevel* (V). Pada pengujian tarik, nilai rata-rata tegangan maksimum tertinggi diperoleh pada spesimen 120X sebesar 497 MPa, diikuti oleh 150X sebesar 496,25 MPa, 150V sebesar 484,75 MPa, dan 120V sebesar 421,25 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa kampuh X memungkinkan distribusi logam las yang lebih merata, penetrasi yang optimal, dan interaksi fusi logam yang lebih baik antara material induk dan logam pengisi. Titik putus material menunjukkan kecenderungan yang sejalan, dengan spesimen kampuh X mampu menahan deformasi lebih lama sebelum terjadi patah, sedangkan kampuh V menunjukkan titik putus lebih cepat akibat konsentrasi tegangan pada satu sisi sambungan. Pengujian impak menegaskan tren tersebut. Nilai rata-rata energi impak tertinggi dicapai pada spesimen 150X sebesar 2,2675 J, diikuti oleh 120X sebesar 2,215 J, 120V sebesar 1,8525 J, dan 150V sebesar 1,7475 J. Total energi impak juga menunjukkan perbedaan yang signifikan, di mana kampuh X mampu menyerap energi lebih tinggi, menandakan ketangguhan yang lebih baik terhadap beban kejut. Analisis standar deviasi memperkuat temuan ini, karena nilai standar deviasi pada kampuh X relatif rendah (5,715–2,753) dibanding kampuh V (68,246–10,372), menunjukkan konsistensi hasil antarspesimen.

Hasil makrografi mendukung temuan mekanik tersebut. Pada kampuh *single bevel* (V), penetrasi logam las terlihat lebih terfokus pada satu sisi kampuh, dengan distribusi panas yang tidak merata dan HAZ yang cenderung asimetris. Sebaliknya, kampuh *double bevel* (X) menunjukkan penetrasi las dari kedua sisi pelat yang lebih seimbang, distribusi logam las homogen, serta HAZ yang simetris dan stabil. Logam las pada kampuh X membentuk fusi kontinu antara kedua pelat, sehingga mengurangi risiko cacat seperti *incomplete fusion* atau konsentrasi tegangan yang tinggi. Perbedaan struktur makro inilah yang menjelaskan mengapa kampuh X menunjukkan tegangan tarik dan energi impact lebih tinggi dibanding kampuh V. Selain itu, pengaruh arus pengelasan juga terlihat pada hasil pengujian. Arus yang lebih rendah cenderung menghasilkan penetrasi las kurang optimal sehingga nilai tegangan maksimum dan energi impact menurun, sedangkan arus lebih tinggi meningkatkan ketangguhan sambungan tetapi jika terlalu tinggi dapat menyebabkan distorsi atau perubahan mikrostruktur yang tidak diinginkan. Kombinasi arus optimal dengan kampuh X menghasilkan keseimbangan antara kekuatan tarik dan ketangguhan impact, serta penetrasi las yang merata, sehingga sambungan las yang dihasilkan memiliki performa mekanik terbaik.

Berdasarkan hasil pengujian tarik, impact, dan makrografi, dapat disimpulkan bahwa kampuh *double bevel* (X) dengan arus pengelasan optimal mampu menghasilkan sambungan las yang kuat, tangguh, dan homogen. Sambungan ini menunjukkan tegangan maksimum tertinggi, energi impact paling tinggi, dan distribusi logam las yang merata pada penampang makro. Sementara itu, kampuh *single bevel* (V) meskipun sederhana, memiliki nilai tegangan tarik dan energi impact yang lebih rendah karena penetrasi las yang tidak merata dan HAZ yang asimetris.

#### 4.5 Hubungan Kualitas Mekanik dan Struktur Makro

Berdasarkan hasil pengujian tarik, pengujian impact, serta pengamatan makrografi, terdapat keterkaitan yang jelas antara karakteristik struktur makro sambungan las dengan performa mekanik yang dihasilkan. Pengujian tarik berfungsi untuk menentukan nilai tegangan maksimum, tegangan patah, dan regangan maksimum, sedangkan pengujian impact digunakan untuk menilai ketangguhan sambungan terhadap beban kejut melalui energi serap saat terjadi fraktur. Kedua pengujian tersebut menunjukkan bahwa variasi struktur makro memberikan pengaruh langsung terhadap kualitas mekanik material hasil pengelasan.

Sambungan dengan kampuh *double bevel* (X) menunjukkan karakteristik penetrasi logam las yang lebih merata dari kedua sisi pelat, dengan fusi yang kontinu serta daerah HAZ yang relatif simetris. Kondisi ini berkontribusi terhadap peningkatan nilai tegangan tarik maksimum dan energi impact. Sebagai contoh, spesimen 120X menghasilkan tegangan tarik sebesar 497 MPa, sedangkan energi impact pada spesimen 150X mencapai 2,2675 J. Distribusi logam las yang homogen dan keseimbangan HAZ memungkinkan penyebaran tegangan yang lebih merata, sehingga sambungan mampu menahan beban tarik dan menyerap energi tumbukan secara lebih optimal sebelum mengalami kegagalan.

Sebaliknya, kampuh *single bevel* (V) memperlihatkan penetrasi logam las yang lebih dominan pada satu sisi, disertai HAZ yang tidak simetris dan distribusi logam las yang kurang merata. Kondisi ini tercermin pada hasil pengujian, di mana spesimen 120V hanya mencapai tegangan maksimum 421,25 MPa dengan energi impact rata-rata 1,8525 J, yang lebih rendah dibandingkan kampuh X.

Ketidakhomogenan struktur makro tersebut menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan pada area tertentu sehingga mempercepat inisiasi retak dan menurunkan ketangguhan sambungan secara keseluruhan.

#### 4.6 Kombinasi parameter yang optimal

Berdasarkan hasil pengujian tarik, impact, dan makrografi yang telah dilakukan, analisis terhadap keempat kombinasi parameter menunjukkan bahwa jenis kampuh memberikan pengaruh yang jauh lebih dominan dibandingkan variasi kuat arus dalam menentukan kualitas sambungan las FCAW posisi 3G pada baja ABS Grade A.

Kombinasi kampuh V dengan arus 120 A (120V) menghasilkan performa mekanik terendah di antara seluruh kombinasi yang diuji, dengan tegangan tarik maksimum rata-rata hanya 421,25 MPa dan nilai impact 7,38 J/mm<sup>2</sup>. Tingginya standar deviasi pada kombinasi ini ( $\sigma = 68,246$  MPa) mengindikasikan bahwa arus 120 A tidak cukup untuk menjamin penetrasi yang merata dan konsisten pada kampuh V di posisi pengelasan vertikal, sehingga kualitas sambungan yang dihasilkan cenderung tidak stabil dan berisiko lebih tinggi mengalami cacat las berupa incomplete fusion pada akar sambungan. Sementara itu, kombinasi kampuh V dengan arus 150 A (150V) menunjukkan peningkatan tegangan tarik yang cukup berarti menjadi 484,75 MPa, namun nilai impact rata-ratanya justru turun menjadi 6,93 J/mm<sup>2</sup> terendah di antara semua kombinasi. Fenomena ini disebabkan oleh peningkatan heat input akibat arus yang lebih besar, yang memperluas HAZ secara asimetris pada kampuh V sehingga menurunkan ketangguhan sambungan terhadap beban benturan. Dengan demikian, meskipun kombinasi 150V masih memenuhi batas minimum tegangan luluh BKI sebesar 235 MPa dan dapat dipertimbangkan untuk sambungan standar non-kritis seperti pelat lambung dan pelat dek karena efisiensinya dalam hal waktu dan jumlah pass pengelasan, kombinasi ini tidak direkomendasikan untuk elemen struktural yang menuntut ketangguhan tinggi.

Sebaliknya, kedua kombinasi yang menggunakan kampuh X secara konsisten mengungguli kampuh V pada seluruh aspek pengujian. Kombinasi kampuh X dengan arus 120 A (120X) menghasilkan tegangan tarik maksimum tertinggi sebesar 497 MPa dengan tingkat konsistensi data yang sangat baik ditunjukkan oleh nilai individual spesimen yang berkisar antara 492 hingga 505 MPa serta nilai impact rata-rata 8,85 J/mm<sup>2</sup>. Keunggulan kombinasi ini bersumber dari karakteristik kampuh X yang memungkinkan pengelasan dilakukan dari dua sisi, sehingga penetrasi bersifat bilateral dan lebih merata, distribusi panas lebih seimbang, serta HAZ yang terbentuk bersifat simetris pada kedua sisi sambungan. Kondisi ini secara langsung meminimalkan potensi cacat las seperti incomplete fusion, undercut, dan porositas, karena kolam las pada posisi 3G dapat dikendalikan dengan lebih baik pada heat input yang lebih rendah. Adapun kombinasi kampuh X dengan arus 150 A (150X) menghasilkan nilai impact tertinggi di antara semua kombinasi, yaitu 9,07 J/mm<sup>2</sup>, dengan tegangan tarik yang tetap tinggi sebesar 496,25 MPa dan tegangan luluh rata-rata tertinggi sebesar 362,5 MPa. Pada kampuh X, kenaikan arus tidak menimbulkan efek negatif terhadap ketangguhan sebagaimana yang terjadi pada kampuh V, karena distribusi panas dari dua sisi tetap terkontrol dan lebih merata sehingga struktur makro sambungan tetap terjaga kualitasnya.

Dengan mempertimbangkan seluruh aspek tersebut, kombinasi kampuh X dengan arus 120 A merupakan kombinasi yang paling optimal apabila prioritas utama adalah kekuatan tarik tertinggi, konsistensi hasil, dan minimalisasi cacat

pengelasan, sehingga paling tepat diaplikasikan pada sambungan struktural kritis seperti sambungan lunas dan girder memanjang yang menuntut integritas sambungan tertinggi. Sementara itu, kombinasi kampuh X dengan arus 150 A menjadi pilihan terbaik apabila ketangguhan impak yang paling diutamakan, misalnya pada bagian kapal yang rawan menerima beban dinamis atau tumbukan. Adapun untuk sambungan non-kritis yang mengutamakan efisiensi produksi, kombinasi kampuh V dengan arus 150 A masih dapat dipertimbangkan karena nilai tegangan tariknya yang masih jauh melampaui standar minimum BKI, dengan keunggulan proses pengelasan satu sisi yang lebih hemat waktu dan material. Secara keseluruhan, seluruh kombinasi yang melibatkan kampuh X terbukti lebih unggul dari kampuh V dalam hal kualitas mekanik maupun integritas struktur makro, dan jenis kampuh terbukti menjadi parameter yang lebih menentukan dibandingkan kuat arus dalam menghasilkan sambungan las FCAW posisi 3G yang kuat, tangguh, dan bebas dari cacat struktural yang signifikan.

*“Halaman ini sengaja di kosongkan”*