

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebelum menyajikan hasil perhitungan dan pengujian pada bab ini, perlu dijelaskan terlebih dahulu konsep paduan hasil pengecoran yang sempurna, karena tingkat kesempurnaan hasil cor akan secara langsung memengaruhi seberapa dekat nilai kekuatan mekanik yang diperoleh dari pengujian eksperimental terhadap nilai teoritis maupun data literatur.

Paduan cor sempurna didefinisikan sebagai hasil pengecoran yang struktur dan komposisinya sesuai dengan rancangan awal, tanpa cacat pengecoran yang signifikan yang dapat menurunkan sifat mekanik material. Karakteristik utama yang menandai kesempurnaan tersebut adalah homogenitas paduan, yaitu tersebarannya unsur kuningan (*Brass*) secara merata di dalam matriks aluminium tanpa segregasi maupun konsentrasi lokal yang berlebihan, serta porositas rendah, yaitu minimnya rongga udara atau gas terperangkap yang terbentuk selama proses peleburan dan pembekuan logam (Apriliyanto, 2014; Carlton, 2018)

Kriteria yang digunakan untuk menilai tingkat kesempurnaan paduan cor tersebut meliputi:

- (1) homogenitas struktur mikro, yang idealnya diverifikasi melalui pengujian metalografi;
- (2) kesesuaian komposisi aktual terhadap komposisi rancangan (90% Aluminium–10% Kuningan dan Aluminium 100%), yang dapat dipastikan melalui uji komposisi kimia; dan
- (3) tingkat porositas, yang memengaruhi luas penampang efektif material dalam menahan beban.

Pada penelitian ini, verifikasi struktur mikro dan komposisi aktual hasil pengecoran tidak dilakukan, sehingga tingkat homogenitas paduan Aluminium-Kuningan yang sesungguhnya tidak dapat dipastikan secara langsung. Kondisi ini menjadi salah satu variabel yang perlu dipertimbangkan dalam menginterpretasikan hasil pengujian tarik dan bending pada Sub-bab 4.3 dan 4.4, khususnya pada penyimpangan nilai kekuatan antar spesimen dengan komposisi yang sama.

4.1 Hasil Perhitungan Perancangan Propeller

*Tabel 4. 1 Data Utama Kapal
(Sumber: Wibawa et al. (2022))*

Nama	Ukuran
Length Over All (LOA)	9 M
Length Between Perpendicular (LPP)	7,61 M
Breadth (B)	1,15 M
Draft (T)	0,5 M
Height (H)	1,20 M
Service Speed (Vs)	6 Knots
Coeffisien Block (Cb)	0,5

Nama	Keterangan
Main Engine Type	Diamond DI 1100 HM
Power	8,09 Kw
RPM	2400 RPM
Propeller Type	B-Series
Number Of Leaves	3
Diameter	381 Mm
Direction Of Rotation	Right-Handed

Perhitungan propeller dilakukan untuk mendapatkan propeller yang tepat. Berdasarkan penelitian Wibawa et al. (2022), langkah-langkah perhitungan propeller adalah sebagai berikut:

a. Diameter Propeller

Diameter propeller pada New Fishing Vessel berukuran 15 inch / 381 mm, sesuai rekomendasi spesifikasi mesin.

b. Blade Area Ratio (A_e/A_o)

Untuk menghasilkan gaya dorong propeller yang besar, nilai A_e/A_o berkisar antara 0,30-1,05. Nilai yang dipilih adalah $A_e/A_o = 0,50$.

c. Pitch Ratio (P/D)

Nilai Pitch Ratio berkisar antara 0,50-1,4. Nilai yang dipilih adalah $P/D = 0,8$.

d. Jumlah Daun Propeller

Jumlah daun propeller dipilih 3 (tiga) daun karena merupakan kapal kecil dan telah direkomendasikan pada spesifikasi mesin.

e. Kecepatan Maju (V_a)

Untuk mencari kecepatan maju (V_a), diperlukan nilai wake fraction (w):

$$w = 0,55 \times C_b - 0,2$$

$$w = 0,55 \times 0,5 - 0,2$$

$$w = 0,075$$

$$V_a = (1 - w) \times V_s$$

$$V_a = (1 - 0,075) \times 3,0864$$

$$V_a = 2,855 \text{ m/s}$$

f. Koefisien Maju (J)

$$J = \frac{V_a}{(n \times D)}$$

$$J = \frac{2,855}{(13,33 \times 0,381)}$$

$$J = 0,61$$

g. Perhitungan Kavitas

Perhitungan kavitas dilakukan menggunakan metode Burrill untuk memastikan propeller tidak mengalami kavitas berlebih saat beroperasi. Syarat propeller tidak mengalami kavitas apabila nilai $\tau_{cal} < \tau_c$. Langkah perhitungannya adalah sebagai berikut:

1. Menghitung A_e

$$A_o = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2$$

$$A_o = \pi \left(\frac{0,381}{2} \right)^2$$

$$A_o = 0,114 \text{ m}^2$$

$$A_e = A_o \times \left(\frac{A_e}{A_o} \right)$$

$$A_e = 0,114 \times 0,5$$

$$A_e = 0,057$$

2. Menghitung nilai A_p

$$A_p = A_d \times \left(1,067 - \left(0,229 \times \frac{P}{D} \right) \right)$$

$$\text{Dimana : } A_d = A_e$$

$$A_p = 0,05$$

3. Menghitung nilai $(V_r)^2$

$$V_r^2 = V_a^2 \times (0,7 \times \pi \times n \times D)^2$$

$$Vr^2 = 2,855^2 \times (0,7 \times \pi \times 13,33 \times 0,381)^2$$

$$Vr^2 = 126,7$$

4. Menghitung nilai Thrust

$$T = \frac{R_T}{(1 - t)}$$

$$T = \frac{0,8}{(1 - 0,065)}$$

$$T = 855,614 \text{ N}$$

5. Menghitung nilai τ_{cal}

$$\tau_{cal} = \frac{T}{Ap \times 0,5 \times \rho \times Vr^2}$$

$$\tau_{cal} = \frac{855,614}{0,05 \times 0,5 \times 1025 \times 126,7}$$

$$\tau_{cal} = 0,261$$

6. Menghitung nilai $\sigma_{0,7R}$

$$\sigma_{0,7R} = \frac{188,2 + 19,62h}{V_a^2 + 4,836(Dn)^2}$$

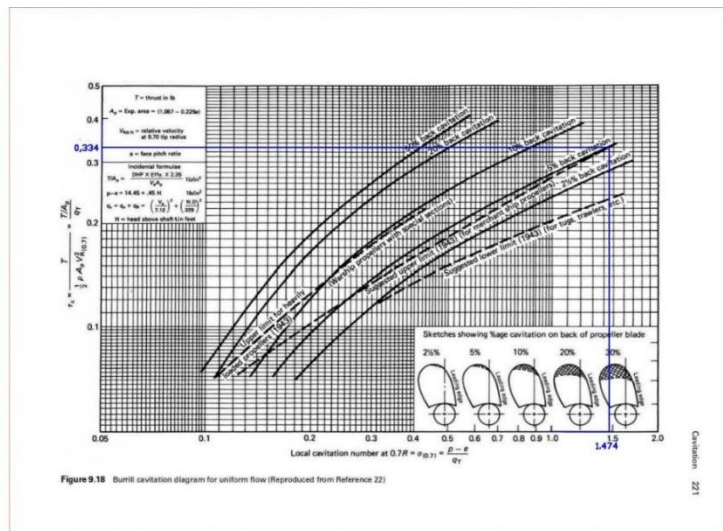
$$\sigma_{0,7R} = \frac{188,2 + 19,62 \times 0,39}{2,855^2 + 4,836(0,381 \times 13,33)^2}$$

$$\sigma_{0,7R} = 1,474$$

Nilai $\sigma_{0,7R}$ tersebut di plotkan pada Burrill Diagram untuk memperoleh τ_c diagram.

Untuk syarat terjadinya kavitasi adalah $\tau_{cal} < \tau_c$.

Masukkan nilai $\sigma_{0,7R}$ ke diagram burill sehingga akan diperoleh nilai τ_c diagram.



Gambar 4. 1 Diagram Burril
(Sumber: Penulis, 2026)

Untuk $\sigma_{0,7R} = 1,474$ didapat nilai τ_c diagram sebesar 0,334

Setelah didapat nilai τ_c diagram selanjutnya dicek dengan syarat kavitasi untuk menentukan apakah propeller yang dipilih mengalami kavitasi atau tidak.

$$\tau_{cal} < \tau_c$$

$$0,261 < 0,334$$

Propeller yang dipilih telah memenuhi syarat kavitasi karena nilai τ_c lebih kecil dari nilai τ_c max, hal ini berarti bahwa propeller tersebut bebas dari kavitasi.

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh propeller dengan spesifikasi sebagai berikut :

*Tabel 4. 2 Spesifikasi Propeller Hasil Perhitungan
(Sumber : Penulis, 2026)*

Keterangan	nilai
Tipe Propeller	B3-50
Diameter	0,381 m
P/D	0,80
Ae/Ao	0,50
RPM	2400
Va	2,855 m/s

4.2 Perhitungan Kekuatan Material Propeller

Perhitungan kekuatan struktur daun propeller dilakukan untuk menentukan batas kekuatan minimum material yang harus dipenuhi agar propeller mampu beroperasi secara aman. Analisis dilakukan pada penampang pangkal (akar) daun propeller, dengan memodelkan daun propeller sebagai balok kantilever. Gaya thrust pada tiap daun diasumsikan bekerja pada titik paling efektif di sepanjang daun, yaitu pada jarak $0,6R$ dari pusat hub, sehingga momen lentur pada penampang pangkal daun dihitung sebagai hasil kali gaya tersebut dengan lengan momen sejauh $0,6R$, mengacu pada pendekatan yang digunakan Carlton (2018) dalam perhitungan momen lentur propeller.

4.2.1 Perhitungan Kekuatan Tarik Minimum

Kekuatan tarik minimum material dihitung berdasarkan tegangan tarik yang timbul akibat momen lentur aksial dari gaya dorong propeller pada penampang pangkal daun.

- Distribusi *thrust* pada daun propeller

Thrust total dibagi pada setiap daun propeller

$$F_b = \frac{T}{Z}$$

$$F_b = \frac{855,614}{3}$$

$$F_b = 285,2 \text{ N}$$

- Momen lentur pangkal daun

Momen lentur aksial pada penampang akar daun dihitung sebagai berikut:

$$M_b = F_b \times r$$

$$M_b = 285,2 \times 0,6R$$

$$M_b = 285,2 \times 114,3$$

$$M_b = 32598,36 \text{ Nmm}$$

- c. Modulus penampang pangkal daun (W)

$$W = C_n \times b \times t^2$$

$$W = 0,09 \times 75,96 \times 15,8^2$$

$$W = 1706,64 \text{ mm}^3$$

- d. Tegangan Tarik minimum (σ_{minimum})

$$\sigma_{\text{minimum}} = \frac{M_b}{W}$$

$$\sigma_{\text{minimum}} = \frac{32598,36}{1706,64}$$

$$\sigma_{\text{minimum}} = 19,10 \text{ N/mm}^2$$

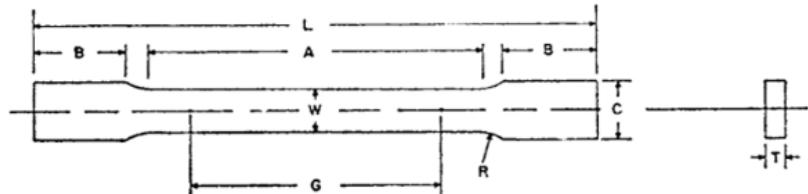
$$\sigma_{\text{minimum}} = 19,10 \text{ MPa}$$

Perhitungan tegangan kerja minimum ini digunakan sebagai acuan validasi khusus untuk hasil uji tarik pada Sub-bab 4.3. Validasi serupa tidak berlaku untuk hasil uji bending karena perbedaan sifat kuantitatif/kualitatif kedua metode pengujian (lihat Sub-bab 4.4)

4.3 Hasil Pengujian Tarik

Pengujian tarik ini dilakukan untuk mendapatkan nilai kekuatan maksimum dan nilai kekuatan luluh material propeller kapal nelayan hasil pengecoran. Pengujian ini dilakukan berdasarkan standart ASTM E-8.

Spesimen uji tarik dibuat dengan ukuran sesuai standart ASTM E-8 seperti pada gambar 4.2



Gambar 4. 2 Dimensi Spesimen Uji Tarik
(Sumber: Penulis, 2026)

Keterangan:

- | | |
|-------------------------------|-----------|
| 1. Gauge Leght (G) | : 50 mm |
| 2. Width (W) | : 12 mm |
| 3. Thickness (T) | : 10 mm |
| 4. Radius of Fillet (R) | : 12,5 mm |
| 5. Overall Length (L) | : 200 mm |
| 6. Length Reduced Section (A) | : 60 mm |
| 7. Length of Grip Section (B) | : 60 mm |
| 8. Width of Grip Section (C) | : 20 mm |

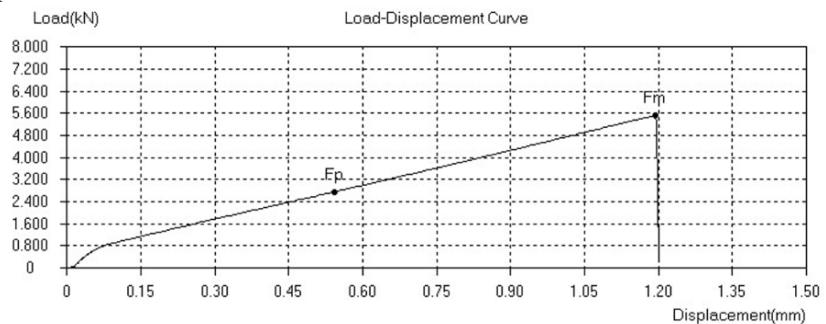
4.3.1 Perhitungan Uji Tarik Komposisi Aluminium 90% - Kuningan 10%



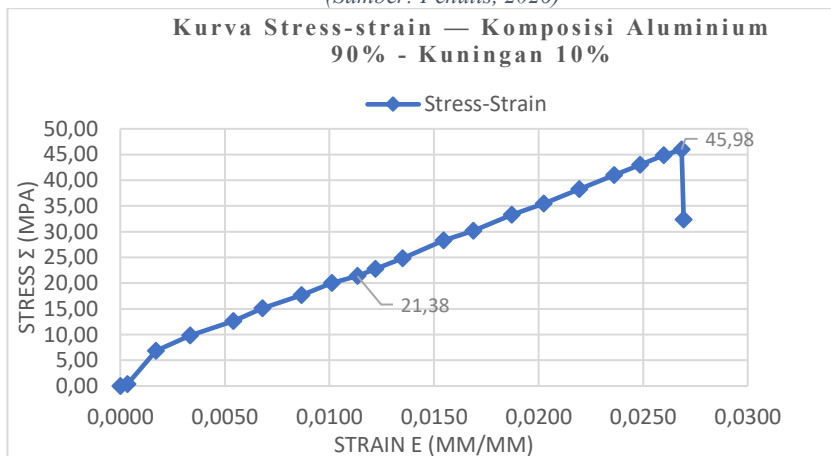
Gambar 4. 3 Spesimen Hasil Uji Tarik Komposisi Aluminium 90% - Kuningan 10%
(Sumber: Penulis, 2026)

1. Perhitungan hasil pengujian tarik Komposisi Aluminium 90% - Kuningan 10% spesimen 1

Setelah dilaksanakan pengujian tarik pada spesimen 1, diperoleh data hasil pengukuran yang disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara penambahan beban (*Load*) dengan perpanjangan spesimen/*Displacement* (mm), seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.4. Berdasarkan grafik tersebut, terlihat bahwa spesimen 1 mengalami peningkatan beban secara bertahap seiring dengan bertambahnya deformasi pada material hingga akhirnya mencapai titik patah.



Gambar 4. 4 Grafik Load-Displacement Hasil Uji Tarik Komposisi Aluminium 90% - Kuningan 10% spesimen 1
(Sumber: Penulis, 2026)



Gambar 4. 5 Kurva Stress-strain Komposisi Aluminium 90% - Kuningan 10% Spesimen 1
(Sumber: Penulis, 2026)

Setelah diperoleh grafik load-displacement dari hasil pengujian tarik, selanjutnya dilakukan konversi data untuk menghasilkan grafik *stress-strain*. Proses konversi tersebut dilakukan secara manual dengan membagi kurva grafik menjadi 21 titik pengamatan yang kemudian dihitung nilai tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) pada masing-masing titik menggunakan persamaan yang telah ditetapkan. Hasil perhitungan manual tersebut disajikan dalam bentuk grafik *stress-strain* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5, lalu untuk data hasil perhitungan secara lengkap dimuat pada Tabel 4.3

Tabel 4. 3 Tabel Nilai Stress-strain Komposisi Aluminium 90% - Kuningan 10%
Spesimen 1
(Sumber: Penulis, 2026)

No	Strain ϵ (%)	Stress σ (MPa)
P0	0,000%	0,000
P1	0,034%	0,35
P2	0,170%	6,82
P3	0,334%	9,83
P4	0,540%	12,59
P5	0,680%	15,13
P6	0,866%	17,68
P7	1,012%	19,99
Pyield	1,134%	21,38
P9	1,220%	22,76
P10	1,350%	24,84
P11	1,546%	28,31
P12	1,688%	30,16
P13	1,872%	33,28
P14	2,024%	35,47
P15	2,194%	38,24
P16	2,362%	41,02
P17	2,486%	42,98
P18	2,598%	44,83
Pmax	2,684%	45,98
Pbreak	2,694%	32,35

- a. Luas Penampang Spesimen (mm^2)

$$A_0 = W \times T = \text{mm}^2$$

$$A_0 = 12 \times 10$$

$$A_0 = 120 \text{ mm}^2$$

- b. Yield Stress (N/mm^2)

$$\sigma_{\text{yield}} = \frac{P_{\text{yield}}}{A_0} = \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{yield}} = \frac{2565}{120}$$

$$\sigma_{\text{yield}} = 21,38 \text{ N/mm}^2$$

- c. Maximum Stress (N/mm^2)

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{P_{\text{max}}}{A_0} = \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{5518}{120}$$

$$\sigma_{\text{max}} = 45,98 \text{ N/mm}^2$$

d. Strain at Max Load (ϵ)

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

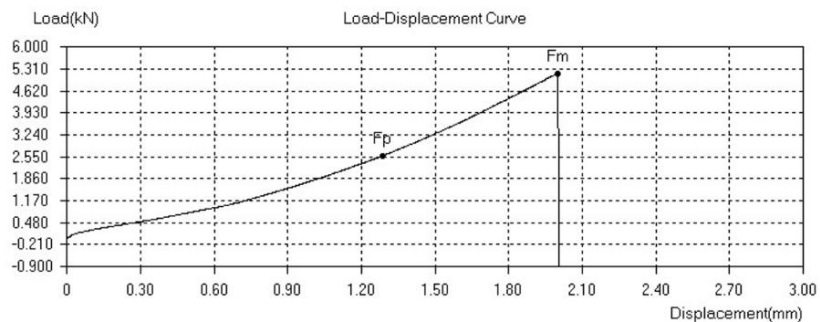
$$\epsilon = \frac{1,342}{50} \times 100\%$$

$$\epsilon = 2,684 \%$$

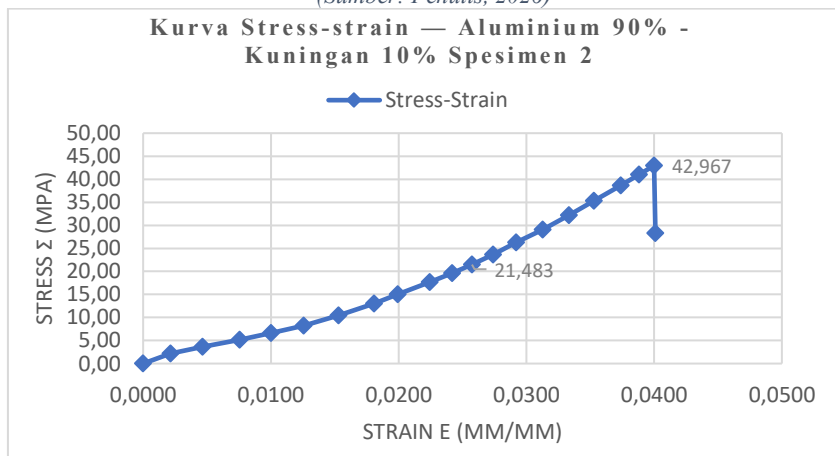
Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh nilai yield stress pada spesimen sebesar 21,38 N/mm² yang didapat dari pembagian antara beban luluh (Pyield) sebesar 2565 N terhadap luas penampang awal (A₀) sebesar 120 mm². Selanjutnya, nilai maximum stress yang mampu ditahan oleh spesimen diperoleh sebesar 45,98 N/mm² yang merupakan hasil pembagian antara beban maksimum (Pmax) sebesar 5518 N terhadap luas penampang awal yang sama. Adapun nilai strain pada saat beban maksimum (strain at max load) diperoleh sebesar 2,684%, yang dihitung berdasarkan perbandingan antara *displacement* saat beban maksimum (δ) sebesar 1,342 mm terhadap panjang awal spesimen (L₀) sebesar 50 mm. Hasil-hasil tersebut menunjukkan karakteristik mekanis spesimen yang meliputi batas luluh, kekuatan maksimum, serta kemampuan deformasi material hingga mencapai beban puncak sebelum terjadi kegagalan.

2. Perhitungan hasil pengujian tarik Komposisi Aluminium 90% - Kuningan 10% spesimen 2

Setelah dilaksanakan pengujian tarik pada spesimen 2, diperoleh data hasil pengukuran yang disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara penambahan beban (*Load*) dengan perpanjangan spesimen/*Displacement* (mm), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6. Berdasarkan grafik tersebut, terlihat bahwa spesimen 2 mengalami peningkatan beban secara bertahap seiring dengan bertambahnya deformasi pada material hingga akhirnya mencapai titik patah.



Gambar 4. 6 Grafik Load-Displacement Hasil Uji Tarik Komposisi Aluminium 90% - Kuningan 10% spesimen 2
(Sumber: Penulis, 2026)



Gambar 4. 7 Kurva Stress-strain — Komposisi Aluminium 90% - Kuningan 10% Spesimen 2
(Sumber: Penulis, 2026)

Setelah diperoleh grafik load-displacement dari hasil pengujian tarik, selanjutnya dilakukan konversi data untuk menghasilkan grafik stress-strain. Proses konversi tersebut dilakukan secara manual dengan membagi kurva grafik menjadi 21 titik pengamatan yang kemudian dihitung nilai tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) pada masing-masing titik menggunakan persamaan yang telah ditetapkan. Hasil perhitungan manual tersebut disajikan dalam bentuk grafik *stress-strain* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7, lalu untuk data hasil perhitungan secara lengkap dimuat pada Tabel 4.4

Tabel 4. 4 Tabel Nilai Stress-strain Komposisi Aluminium 90% - Kuningan 10% Spesimen 2
(Sumber: Penulis, 2026)

No	Strain ϵ (%)	Stress σ (MPa)
P0	0,000	0,000
P1	0,002	2,150
P2	0,005	3,617
P3	0,008	5,175
P4	0,010	6,642
P5	0,013	8,200
P6	0,015	10,450
P7	0,018	12,992
P8	0,020	15,042
P9	0,022	17,675
P10	0,024	19,625
Pyield	0,026	21,483
P12	0,027	23,633
P13	0,029	26,267
P14	0,031	29,100
P15	0,033	32,225
P16	0,035	35,350
P17	0,037	38,675
P18	0,039	41,017
Pmax	0,040	42,967
Pbreak	0,040	28,317

- a. Luas Penampang Spesimen (mm^2)

$$A_0 = W \times T = \text{mm}^2$$

$$A_0 = 12 \times 10$$

$$A_0 = 120 \text{ mm}^2$$

- b. Yield Stress (N/mm^2)

$$\sigma_{\text{yield}} = \frac{P_{\text{yield}}}{A_0} = \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{yield}} = \frac{2578}{120}$$

$$\sigma_{\text{yield}} = 21,48 \text{ N/mm}^2$$

- c. Maximum Stress (N/mm^2)

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{P_{\text{max}}}{A_0} = \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{5156}{120}$$

$$\sigma_{\text{max}} = 42,97 \text{ N/mm}^2$$

d. Strain at Max Load (ϵ)

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

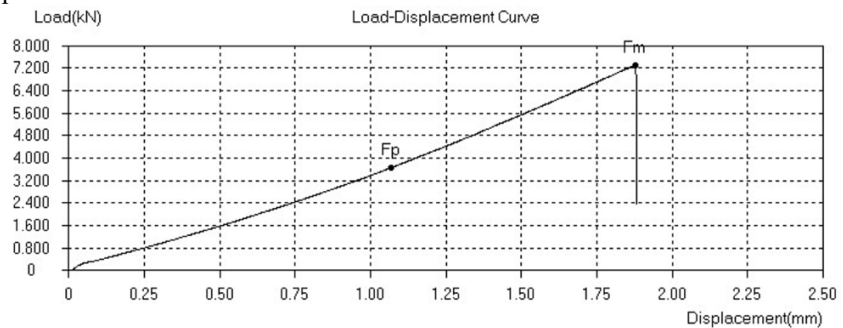
$$\epsilon = \frac{2}{50} \times 100\%$$

$$\epsilon = 4\%$$

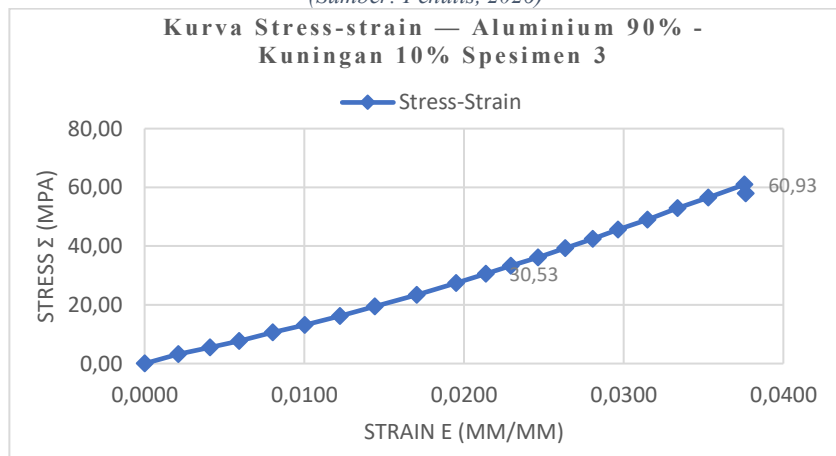
Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh nilai yield stress pada spesimen sebesar 21,48 N/mm² yang didapat dari pembagian antara beban luluh (P_{yield}) sebesar 2578 N terhadap luas penampang awal (A_0) sebesar 120 mm². Selanjutnya, nilai *maximum stress* yang mampu ditahan oleh spesimen diperoleh sebesar 42,97 N/mm² yang merupakan hasil pembagian antara beban maksimum (P_{max}) sebesar 5156 N terhadap luas penampang awal yang sama. Adapun nilai strain pada saat beban maksimum (*strain at max load*) diperoleh sebesar 4%, yang dihitung berdasarkan perbandingan antara *displacement* saat beban maksimum (δ) sebesar 2 mm terhadap panjang awal spesimen (L_0) sebesar 50 mm. Hasil-hasil tersebut menunjukkan karakteristik mekanis spesimen yang meliputi batas luluh, kekuatan maksimum, serta kemampuan deformasi material hingga mencapai beban puncak sebelum terjadi kegagalan.

3. Perhitungan hasil pengujian tarik Komposisi Aluminium 90% - Kuningan 10% spesimen 3

Setelah dilaksanakan pengujian tarik pada spesimen 3, diperoleh data hasil pengukuran yang disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara penambahan beban (*Load*) dengan perpanjangan spesimen/*Displacement* (mm), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8. Berdasarkan grafik tersebut, terlihat bahwa spesimen 1 mengalami peningkatan beban secara bertahap seiring dengan bertambahnya deformasi pada material hingga akhirnya mencapai titik patah.



Gambar 4. 8 Grafik Load-Displacement Hasil Uji Tarik Komposisi Aluminium 90% - Kuningan 10% spesimen 3
(Sumber: Penulis, 2026)



Gambar 4. 9 Kurva Stress-strain Komposisi Aluminium 90% - Kuningan 10% Spesimen 3
(Sumber: Penulis, 2026)

Setelah diperoleh grafik load-displacement dari hasil pengujian tarik, selanjutnya dilakukan konversi data untuk menghasilkan grafik stress-strain. Proses konversi tersebut dilakukan secara manual dengan membagi kurva grafik menjadi 21 titik pengamatan yang kemudian dihitung nilai tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) pada masing-masing titik menggunakan persamaan yang telah ditetapkan. Hasil perhitungan manual tersebut disajikan dalam bentuk grafik *stress-strain* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9, lalu untuk data hasil perhitungan secara lengkap dimuat pada Tabel 4.5

Tabel 4. 5 Tabel Nilai Stress-strain Komposisi Aluminium 90% - Kuningan 10%
Spesimen 3
(Sumber: Penulis, 2026)

No	Strain ϵ (%)	Stress σ (MPa)
P0	0,0000	0,00
P1	0,0021	3,22
P2	0,0041	5,51
P3	0,0059	7,69
P4	0,0080	10,56
P5	0,0100	13,08
P6	0,0122	16,18
P7	0,0144	19,39
P8	0,0170	23,41
P9	0,0195	27,43
Pyield	0,0214	30,53
P11	0,0229	33,28
P12	0,0246	36,14
P13	0,0263	39,24
P14	0,0281	42,46
P15	0,0296	45,55
P16	0,0315	49,00
P17	0,0334	52,90
P18	0,0353	56,46
Pmax	0,0376	60,93
Pbreak	0,0376	57,95

- a. Luas Penampang Spesimen (mm^2)

$$A_0 = W \times T = \text{mm}^2$$

$$A_0 = 12 \times 10$$

$$A_0 = 120 \text{ mm}^2$$

- b. Yield Stress (N/mm^2)

$$\sigma_{\text{yield}} = \frac{P_{\text{yield}}}{A_0} = \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{yield}} = \frac{3,663}{120}$$

$$\sigma_{\text{yield}} = 30,53 \text{ N/mm}^2$$

- c. Maximum Stress (N/mm^2)

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{P_{\text{max}}}{A_0} = \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{7312}{120}$$

$$\sigma_{\text{max}} = 60,93 \text{ N/mm}^2$$

d. Strain at Max Load (ϵ)

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

$$\epsilon = \frac{0,9}{50} \times 100\%$$

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

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh nilai yield stress pada spesimen sebesar 30,53 N/mm² yang didapat dari pembagian antara beban luluh (Pyield) sebesar 3.663 N terhadap luas penampang awal (A₀) sebesar 120 mm². Selanjutnya, nilai *maximum stress* yang mampu ditahan oleh spesimen diperoleh sebesar 60,93 N/mm² yang merupakan hasil pembagian antara beban maksimum (Pmax) sebesar 7.312 N terhadap luas penampang awal yang sama. Adapun nilai strain pada saat beban maksimum (strain at max load) diperoleh sebesar 1,8%, yang dihitung berdasarkan perbandingan antara *displacement* saat beban maksimum (δ) sebesar 0,9 mm terhadap panjang awal spesimen (L₀) sebesar 50 mm. Hasil-hasil tersebut menunjukkan karakteristik mekanis spesimen yang meliputi batas luluh, kekuatan maksimum, serta kemampuan deformasi material hingga mencapai beban puncak sebelum terjadi kegagalan.

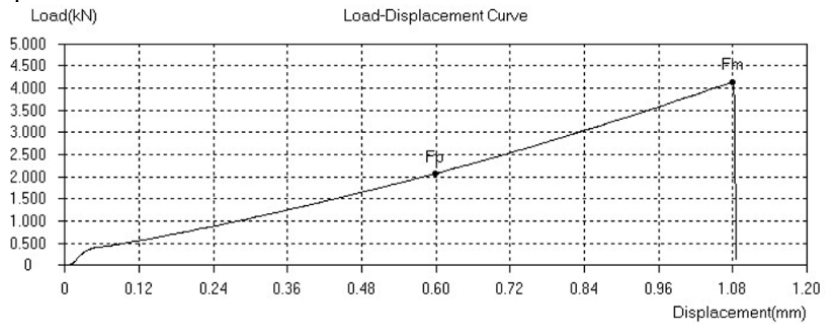
4.3.2 Perhitungan Uji Tarik Komposisi Aluminium 100%



*Gambar 4. 10 Spesimen Hasil Uji Tarik Komposisi Aluminium 100%
(Sumber: Penulis, 2026)*

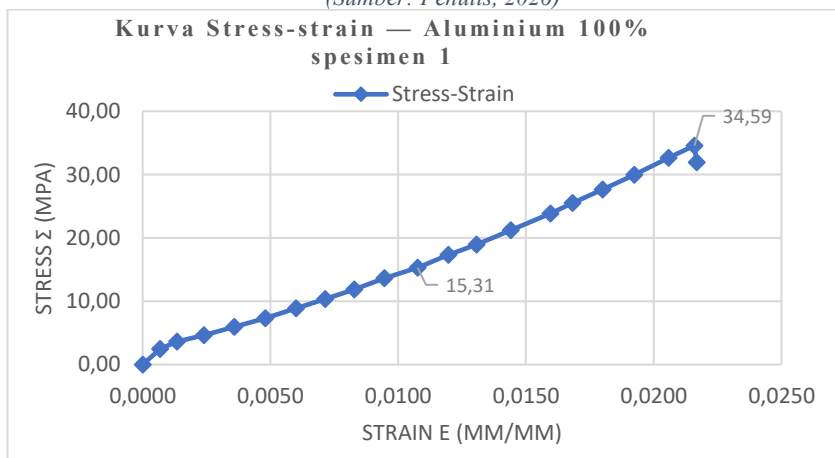
1. Perhitungan hasil pengujian tarik komposisi Aluminium 100% spesimen 1

Setelah dilaksanakan pengujian tarik pada spesimen 1, diperoleh data hasil pengukuran yang disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara penambahan beban (*Load*) dengan perpanjangan spesimen/*Displacement* (mm), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.11 Berdasarkan grafik tersebut, terlihat bahwa spesimen 1 mengalami peningkatan beban secara bertahap seiring dengan bertambahnya deformasi pada material hingga akhirnya mencapai titik patah.



Gambar 4. 11 Grafik Load-Displacement Hasil Uji Tarik Komposisi Aluminium 100% Spesimen 1

(Sumber: Penulis, 2026)



Gambar 4. 12 Kurva Stress-strain Komposisi Aluminium 100% Spesimen 1

(Sumber: Penulis, 2026)

Setelah diperoleh grafik load-displacement dari hasil pengujian tarik, selanjutnya dilakukan konversi data untuk menghasilkan grafik stress-strain. Proses konversi tersebut dilakukan secara manual dengan membagi kurva grafik menjadi 21 titik pengamatan yang kemudian dihitung nilai tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) pada masing-masing titik menggunakan persamaan yang telah ditetapkan. Hasil perhitungan manual tersebut disajikan dalam bentuk grafik *stress-strain* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.12, lalu untuk data hasil perhitungan secara lengkap dimuat pada Tabel 4.6

Tabel 4. 6 Tabel Nilai Stress-strain Komposisi Aluminium 100% Spesimen 1
(Sumber: Penulis, 2026)

No	Strain ϵ (mm/mm)	Stress σ (MPa)
P0	0,0000	0,00
P1	0,0007	2,46
P2	0,0013	3,61
P3	0,0024	4,63
P4	0,0036	5,93
P5	0,0048	7,29
P6	0,0060	8,88
P7	0,0071	10,33
P8	0,0083	11,84
P9	0,0095	13,65
Pyield	0,0108	15,31
P11	0,0120	17,33
P12	0,0131	18,92
P13	0,0144	21,23
P14	0,0160	23,83
P15	0,0168	25,49
P16	0,0180	27,66
P17	0,0192	29,97
P18	0,0206	32,64
Pmax	0,0216	34,59
Pbreak	0,0217	31,92

- a. Luas Penampang Spesimen (mm^2)

$$A_0 = W \times T = \text{mm}^2$$

$$A_0 = 12 \times 10$$

$$A_0 = 120 \text{ mm}^2$$

- b. Yield Stress (N/mm^2)

$$\sigma_{\text{yield}} = \frac{P_{\text{yield}}}{A_0} = \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{yield}} = \frac{2080}{120}$$

$$\sigma_{\text{yield}} = 17,33 \text{ N/mm}^2$$

- c. Maximum Stress (N/mm^2)

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{P_{\text{max}}}{A_0} = \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{4151}{120}$$

$$\sigma_{\text{max}} = 34,59 \text{ N/mm}^2$$

d. Strain at Max Load (ϵ)

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

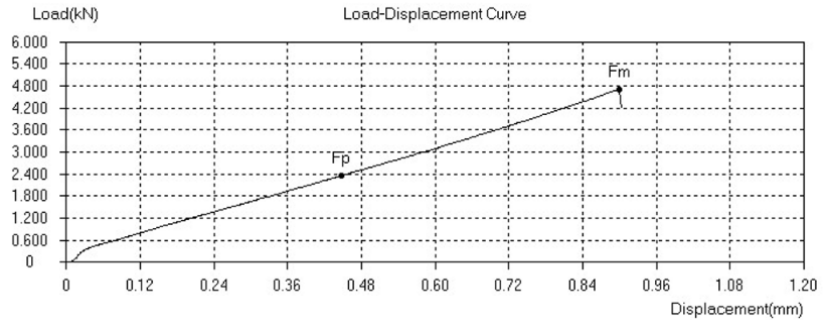
$$\epsilon = \frac{1,080}{50} \times 100\%$$

$$\epsilon = 2,16 \%$$

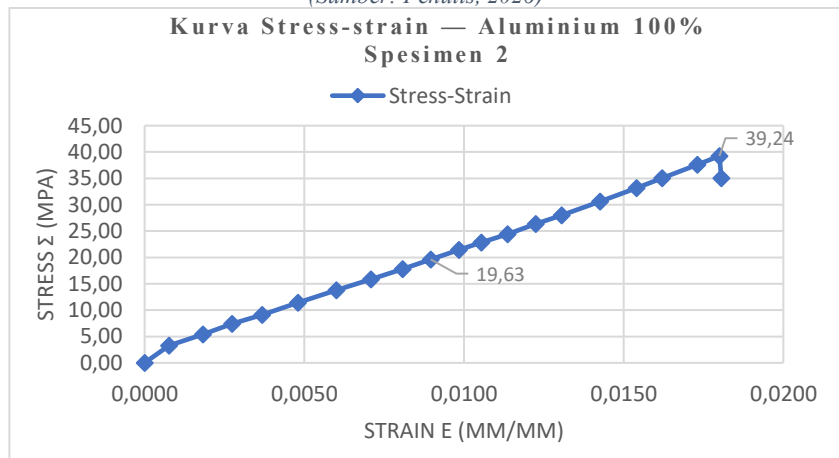
Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh nilai yield stress pada spesimen sebesar 17,33 N/mm² yang didapat dari pembagian antara beban luluh (Pyield) sebesar 2.080 N terhadap luas penampang awal (A₀) sebesar 120 mm². Selanjutnya, nilai *maximum stress* yang mampu ditahan oleh spesimen diperoleh sebesar 34,59 N/mm² yang merupakan hasil pembagian antara beban maksimum (Pmax) sebesar 4.151 N terhadap luas penampang awal yang sama. Adapun nilai strain pada saat beban maksimum (strain at max load) diperoleh sebesar 2,16%, yang dihitung berdasarkan perbandingan antara *displacement* saat beban maksimum (δ) sebesar 1,080 mm terhadap panjang awal spesimen (L₀) sebesar 50 mm. Hasil-hasil tersebut menunjukkan karakteristik mekanis spesimen yang meliputi batas luluh, kekuatan maksimum, serta kemampuan deformasi material hingga mencapai beban puncak sebelum terjadi kegagalan.

2. Perhitungan hasil pengujian tarik Aluminium 100% spesimen 2

Setelah dilaksanakan pengujian tarik pada spesimen 2, diperoleh data hasil pengukuran yang disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara penambahan beban (*Load*) dengan perpanjangan spesimen/*Displacement* (mm), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.13. Berdasarkan grafik tersebut, terlihat bahwa spesimen 2 mengalami peningkatan beban secara bertahap seiring dengan bertambahnya deformasi pada material hingga akhirnya mencapai titik patah.



Gambar 4. 13 Grafik Load-Displacement Hasil Uji Tarik Komposisi Aluminium 100% Spesimen 2
(Sumber: Penulis, 2026)



Gambar 4. 14 Kurva Stress-strain Komposisi Aluminium 100% Spesimen 2
(Sumber: Penulis, 2026)

Setelah diperoleh grafik load-displacement dari hasil pengujian tarik, selanjutnya dilakukan konversi data untuk menghasilkan grafik stress-strain. Proses konversi tersebut dilakukan secara manual dengan membagi kurva grafik menjadi 21 titik pengamatan yang kemudian dihitung nilai tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) pada masing-masing titik menggunakan persamaan yang telah ditetapkan. Hasil perhitungan manual tersebut disajikan dalam bentuk grafik *stress-strain* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.14, lalu untuk data hasil perhitungan secara lengkap dimuat pada Tabel 4.7

Tabel 4. 7 Tabel Nilai Stress-strain Komposisi Aluminium 100% Spesimen 2
(Sumber: Penulis, 2026)

No	Strain ϵ (mm/mm)	Stress σ (MPa)
P0	0,0000	0,00
P1	0,0008	3,27
P2	0,0018	5,43
P3	0,0027	7,40
P4	0,0037	9,13
P5	0,0048	11,44
P6	0,0060	13,77
P7	0,0071	15,83
P8	0,0081	17,82
Pyield	0,0090	19,63
P10	0,0098	21,43
P11	0,0105	22,81
P12	0,0114	24,44
P13	0,0122	26,33
P14	0,0131	27,97
P15	0,0143	30,63
P16	0,0154	33,13
P17	0,0162	35,03
P18	0,0173	37,61
Pmax	0,0180	39,24
Pbreak	0,0181	35,03

- a. Luas Penampang Spesimen (mm^2)

$$A_0 = W \times T = \text{mm}^2$$

$$A_0 = 12 \times 10$$

$$A_0 = 120 \text{ mm}^2$$

- b. Yield Stress (N/mm^2)

$$\sigma_{\text{yield}} = \frac{P_{\text{yield}}}{A_0} = \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{yield}} = \frac{2355}{120}$$

$$\sigma_{\text{yield}} = 19,63 \text{ N/mm}^2$$

- c. Maximum Stress (N/mm^2)

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{P_{\text{max}}}{A_0} = \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{4709}{120}$$

$$\sigma_{\text{max}} = 39,24 \text{ N/mm}^2$$

d. Strain at Max Load (ϵ)

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

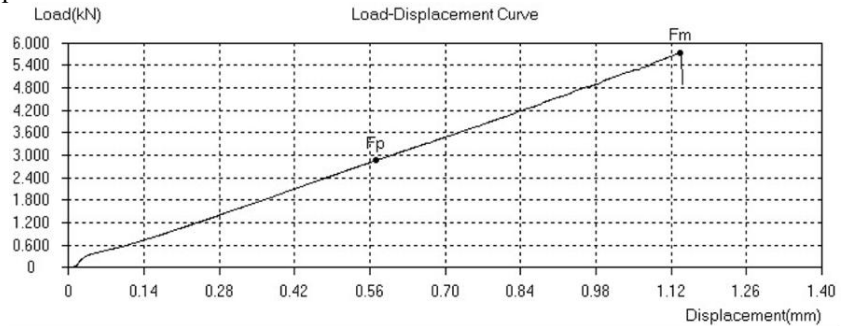
$$\epsilon = \frac{1,342}{50} \times 100\%$$

$$\epsilon = 2,684 \%$$

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh nilai yield stress pada spesimen sebesar 19,63 N/mm² yang didapat dari pembagian antara beban luluh (P_{yield}) sebesar 2.355 N terhadap luas penampang awal (A_0) sebesar 120 mm². Selanjutnya, nilai *maximum stress* yang mampu ditahan oleh spesimen diperoleh sebesar 39,24 N/mm² yang merupakan hasil pembagian antara beban maksimum (P_{max}) sebesar 4.709 N terhadap luas penampang awal yang sama. Adapun nilai strain pada saat beban maksimum (strain at max load) diperoleh sebesar 2,684%, yang dihitung berdasarkan perbandingan antara *displacement* saat beban maksimum (δ) sebesar 1,342 mm terhadap panjang awal spesimen (L_0) sebesar 50 mm. Hasil-hasil tersebut menunjukkan karakteristik mekanis spesimen yang meliputi batas luluh, kekuatan maksimum, serta kemampuan deformasi material hingga mencapai beban puncak sebelum terjadi kegagalan.

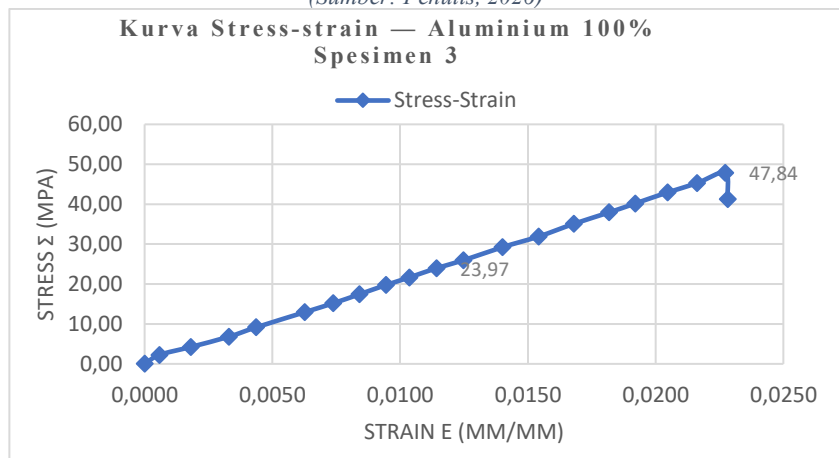
3. Perhitungan hasil pengujian tarik komposisi Aluminium 100% specimen 3

Setelah dilaksanakan pengujian tarik pada specimen 3, diperoleh data hasil pengukuran yang disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara penambahan beban (*Load*) dengan perpanjangan specimen/*Displacement* (mm), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.15. Berdasarkan grafik tersebut, terlihat bahwa specimen 1 mengalami peningkatan beban secara bertahap seiring dengan bertambahnya deformasi pada material hingga akhirnya mencapai titik patah.



Gambar 4. 15 Grafik Load-Displacement Hasil Uji Tarik Komposisi Aluminium 100% Spesimen 3

(Sumber: Penulis, 2026)



Gambar 4. 16 Kurva Stress-strain Komposisi Aluminium 100% Spesimen 3

(Sumber: Penulis, 2026)

Setelah diperoleh grafik load-displacement dari hasil pengujian tarik, selanjutnya dilakukan konversi data untuk menghasilkan grafik stress-strain. Proses konversi tersebut dilakukan secara manual dengan membagi kurva grafik menjadi 21 titik pengamatan yang kemudian dihitung nilai tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) pada masing-masing titik menggunakan persamaan yang telah ditetapkan. Hasil perhitungan manual tersebut disajikan dalam bentuk grafik *stress-strain* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.16, lalu untuk data hasil perhitungan secara lengkap dimuat pada Tabel 4.8

Tabel 4. 8 Tabel Nilai Stress-strain Komposisi Aluminium 100% Spesimen 3
(Sumber: Penulis, 2026)

No	Strain ϵ (mm/mm)	Stress σ (MPa)
P0	0,0000	0,00
P1	0,0006	2,24
P2	0,0018	4,23
P3	0,0033	6,81
P4	0,0044	9,14
P5	0,0063	12,93
P6	0,0074	15,18
P7	0,0084	17,42
P8	0,0094	19,74
P9	0,0104	21,64
Pyield	0,0114	23,97
P11	0,0125	25,95
P12	0,0140	29,23
P13	0,0154	31,90
P14	0,0168	35,08
P15	0,0182	37,93
P16	0,0192	40,18
P17	0,0205	42,93
P18	0,0216	45,26
Pmax	0,0227	47,84
Pbreak	0,0228	41,29

- a. Luas Penampang Spesimen (mm^2)

$$A_0 = W \times T = \text{mm}^2$$

$$A_0 = 12 \times 10$$

$$A_0 = 120 \text{ mm}^2$$

- b. Yield Stress (N/mm^2)

$$\sigma_{\text{yield}} = \frac{P_{\text{yield}}}{A_0} = \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{yield}} = \frac{2876}{120}$$

$$\sigma_{\text{yield}} = 23,97 \text{ N/mm}^2$$

- c. Maximum Stress (N/mm^2)

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{P_{\text{max}}}{A_0} = \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{5741}{120}$$

$$\sigma_{\text{max}} = 47,84 \text{ N/mm}^2$$

d. Strain at Max Load (ϵ)

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

$$\epsilon = \frac{1,136}{50} \times 100\%$$

$$\epsilon = 2,272 \%$$

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh nilai yield stress pada spesimen sebesar 23,97 N/mm² yang didapat dari pembagian antara beban luluh (P_{yield}) sebesar 2.876 N terhadap luas penampang awal (A_0) sebesar 120 mm². Selanjutnya, nilai *maximum stress* yang mampu ditahan oleh spesimen diperoleh sebesar 47,84 N/mm² yang merupakan hasil pembagian antara beban maksimum (P_{max}) sebesar 5.741 N terhadap luas penampang awal yang sama. Adapun nilai strain pada saat beban maksimum (*strain at max load*) diperoleh sebesar 2,272%, yang dihitung berdasarkan perbandingan antara *displacement* saat beban maksimum (δ) sebesar 1,136 mm terhadap panjang awal spesimen (L_0) sebesar 50 mm. Hasil-hasil tersebut menunjukkan karakteristik mekanis spesimen yang meliputi batas luluh, kekuatan maksimum, serta kemampuan deformasi material hingga mencapai beban puncak sebelum terjadi kegagalan.

4.3.3 Hasil Uji Tarik

1. Hasil Uji Tarik Komposisi Aluminium 90% - Kuningan 10%

*Tabel 4. 9 Tabel Rata-rata Hasil Uji Tarik Aluminium 90%-Kuningan 10%
(Sumber: Penulis, 2026)*

Rata-rata Hasil Uji Tarik Aluminium 90%-Kuningan 10%				
Spesimen	Load Max (kN)	Yield Stress (MPa)	Max Stress (MPa)	Strain Max (%)
1	5,518	21,38	45,98	2,684
2	5,156	21,48	42,97	4,000
3	7,312	30,53	60,93	3,756
Rata-Rata	5,995	24,461	49,96	3,480

Berdasarkan hasil pengujian tarik terhadap tiga spesimen komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10% yang disajikan pada Tabel 4.9, diperoleh nilai load max yang bervariasi antara 5,156 kN hingga 7,312 kN, dengan rata-rata sebesar 5,995 kN. Spesimen 3 menghasilkan beban maksimum tertinggi (7,312 kN), diikuti spesimen 1 (5,518 kN) dan spesimen 2 (5,156 kN).

Nilai yield stress (tegangan luluh) ketiga spesimen berkisar antara 21,38–30,53 MPa, dengan rata-rata 24,461 MPa. Pola yang sama terlihat pada nilai max stress (UTS), di mana spesimen 3 kembali menunjukkan nilai tertinggi sebesar 60,93 MPa, sedangkan spesimen 1 dan 2 menghasilkan nilai yang relatif berdekatan yaitu 45,98 MPa dan 42,97 MPa. Rata-rata UTS untuk komposisi ini sebesar 49,96 MPa.

Dari sisi regangan, nilai strain max bervariasi antara 2,684% hingga 4,0%, dengan rata-rata 3,480%. Spesimen 2 menunjukkan regangan tertinggi (4,0%) meskipun nilai load max dan stress-nya justru paling rendah di antara ketiga spesimen, mengindikasikan bahwa spesimen ini mengalami deformasi plastis lebih besar sebelum mencapai beban puncak dibandingkan kedua spesimen lainnya.

Konsistensi antara load max dan max stress pada ketiga spesimen (spesimen dengan beban tertinggi juga menghasilkan tegangan tertinggi) menunjukkan bahwa variasi hasil lebih dipengaruhi oleh perbedaan kondisi material antar spesimen seperti tingkat porositas atau homogenitas lokal hasil pengecoran dibandingkan oleh perbedaan dimensi penampang spesimen, mengingat seluruh spesimen dibuat mengacu pada standar geometri yang sama (ASTM E8/E8M).

2. Hasil Uji Tarik Komposisi Aluminium 100%

*Tabel 4. 10 Rata-Rata Hasil Uji Tarik Aluminium 100%
(Sumber: Penulis, 2026)*

Rata-rata Hasil Uji Tarik Aluminium 100%				
Spesimen	Load Max (kN)	Yield Stress (MPa)	Max Stress (Mpa)	Strain Max (%)
1	4,151	17,33	34,59	2,16
2	4,709	19,63	39,24	1,8
3	5,741	23,97	47,84	2,272
Rata-Rata	4,867	20,308	40,56	2,077

Berdasarkan hasil pengujian tarik terhadap tiga spesimen komposisi Aluminium 100% yang disajikan pada Tabel 4.10, diperoleh nilai load max yang meningkat secara bertahap dari spesimen 1 hingga spesimen 3, yaitu 4,151 kN, 4,709 kN, dan 5,741 kN, dengan rata-rata sebesar 4,867 kN.

Pola peningkatan yang serupa juga terlihat pada nilai yield stress, yaitu 17,33 MPa, 19,63 MPa, dan 23,97 MPa untuk spesimen 1, 2, dan 3 secara berurutan, dengan rata-rata 20,308 MPa. Nilai max stress (UTS) menunjukkan tren yang sejalan, meningkat dari 34,59 MPa (spesimen 1) menjadi 39,24 MPa (spesimen 2) dan 47,84 MPa (spesimen 3), dengan rata-rata 40,56 MPa.

Berbeda dengan pola stress-nya, nilai strain max justru menunjukkan tren menurun kemudian naik kembali: spesimen 1 sebesar 2,16%, turun menjadi 1,8% pada spesimen 2, lalu naik menjadi nilai tertinggi 2,272% pada spesimen 3. Spesimen 3 dengan demikian menghasilkan performa terbaik pada seluruh parameter beban maksimum, tegangan luluh, tegangan maksimum, sekaligus regangan tertinggi sedangkan spesimen 2 menunjukkan keuletan terendah meskipun kekuatannya berada di posisi menengah.

Dibandingkan dengan komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10% pada Tabel 4.9, sebaran nilai UTS pada komposisi Aluminium 100% ini relatif lebih konsisten dan menunjukkan tren kenaikan yang teratur antar spesimen (34,59 → 39,24 → 47,84 MPa), berbeda dengan komposisi Al-Kuningan yang polanya tidak seragam (45,98 → 42,97 → 60,93 MPa). Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan unsur kuningan, meskipun meningkatkan nilai rata-rata kekuatan tarik, turut memperbesar variabilitas hasil antar spesimen kemungkinan akibat distribusi unsur kuningan dalam matriks aluminium yang belum sepenuhnya homogen selama proses peleburan dan pengecoran.

3. Hasil rata-rata uji tarik antara komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10% dengan komposisi aluminium 100%

*Tabel 4. 11 Rata-rata Uji Tarik Kedua Komposisi
(Sumber Penulis, 2026)*

Rata-Rata Uji Tarik				
Komposisi	Load Max (kN)	Yield Stress (MPa)	Max Stress (Mpa)	Strain Max (%)
Aluminium 90%- Kuningan 10%	5,995	24,46	49,96	3,480
Aluminium 100%	4,867	20,31	40,56	2,077

Tabel 4.11 menyajikan rekapitulasi perbandingan nilai rata-rata hasil uji tarik antara komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10% dan Aluminium 100%. Secara keseluruhan, komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10% menunjukkan keunggulan pada seluruh parameter kekuatan yang diuji.

Nilai load max rata-rata komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10% sebesar 5,995 kN, lebih tinggi 23,2% dibandingkan Aluminium 100% yang sebesar 4,867 kN. Peningkatan serupa terlihat pada yield stress, yaitu 24,46 MPa berbanding 20,31 MPa (naik 20,4%), serta pada max stress (UTS), yaitu 49,96 MPa berbanding 40,56 MPa (naik 23,2%).

Perbedaan paling signifikan justru terjadi pada parameter strain max, di mana komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10% menghasilkan regangan rata-rata 3,480%, lebih tinggi 67,5% dibandingkan Aluminium 100% sebesar 2,077%. Peningkatan regangan yang jauh lebih besar dibandingkan peningkatan kekuatan (23,2%) mengindikasikan bahwa penambahan unsur kuningan 10% tidak hanya meningkatkan kekuatan tarik material, tetapi juga secara signifikan

memperbaiki keuletan (ductility)-nya material menjadi mampu menahan deformasi plastis lebih besar sebelum mengalami patah.

Peningkatan ini sejalan dengan sifat mekanik kuningan yang dikenal ulet, sebagaimana dijelaskan pada Sub-bab 2.3 (Setiawan, 2021), sehingga penambahan unsur ini pada matriks aluminium berkontribusi memperbaiki kombinasi kekuatan dan keuletan material secara bersamaan, tidak hanya salah satu sifat saja. Dengan demikian, dari aspek kekuatan tarik murni, komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10% dapat dikatakan lebih unggul.

4.3.4 Evaluasi Hasil Uji Tarik

1. Perhitungan Safety Factor

Evaluasi terhadap hasil uji tarik dilakukan dengan menghitung nilai faktor keamanan (*safety factor*, SF) untuk mengetahui tingkat keamanan masing-masing komposisi material terhadap beban tarik yang diterima. Faktor keamanan diperoleh dengan membandingkan nilai kekuatan tarik maksimum (*Ultimate Tensile Strength*, UTS) rata-rata hasil pengujian dengan nilai kekuatan minimum yang diperoleh dari hasil perhitungan, menggunakan persamaan berikut:

$$SF = \frac{\sigma_{rata-rata}}{\sigma_{minimum}}$$

Dengan menggunakan nilai kekuatan minimum hasil perhitungan sebesar 19,10 MPa, diperoleh nilai safety factor untuk masing-masing komposisi sebagai berikut:

- a) Komposisi Aluminium 90% - Kuningan 10%:

$$SF = \frac{49,961 \text{ MPa}}{19,10 \text{ MPa}}$$

$$SF = 2,61$$

- b) Komposisi Aluminium 100%

$$SF = \frac{40,558 \text{ MPa}}{19,10 \text{ MPa}}$$

$$SF = 2,12$$

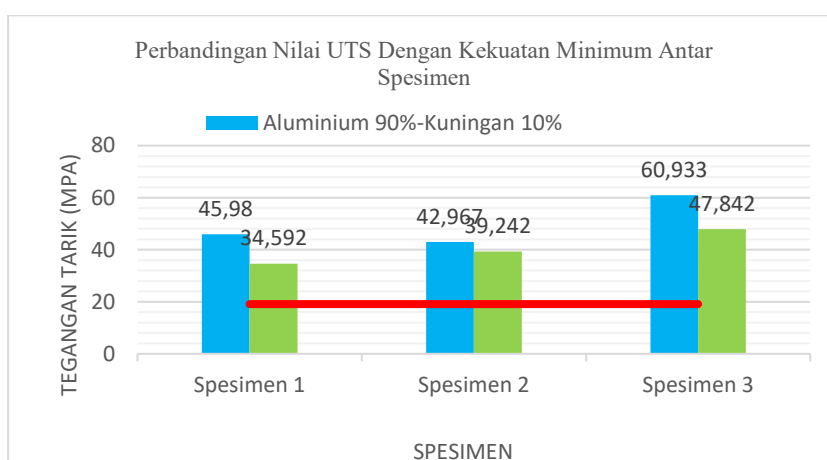
Tabel 4. 12 Hasil Nilai Safety Factor Tiap Komposisi
(Sumber: Penulis, 2026)

Komposisi	Max Stress Rata-Rata (MPa)	Stress Minimum Hasil Perhitungan (MPa)	Safety Factor
Aluminium 90%- Kuningan 10%	49,961	19,10	2,61
Aluminium 100%	40,558	19,10	2,12

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, terlihat bahwa komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10% menghasilkan nilai safety factor sebesar 2,61, sedangkan komposisi Aluminium 100% menghasilkan nilai safety factor sebesar 2,12. Perbedaan nilai SF ini menunjukkan bahwa penambahan unsur Kuningan (Cu-Zn) sebesar 10% pada komposisi pertama memberikan pengaruh terhadap peningkatan kekuatan tarik material, sehingga margin keamanannya lebih tinggi dibandingkan dengan material Aluminium murni (100%) apabila dibandingkan terhadap kekuatan minimum yang telah dihitung.

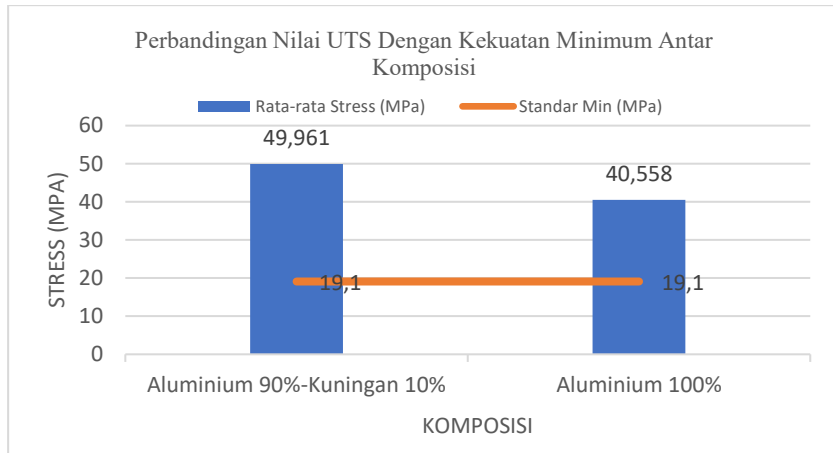
Dengan demikian, komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10% dapat direkomendasikan sebagai pilihan yang lebih optimal ditinjau dari aspek keamanan terhadap beban tarik.

Meskipun demikian, terdapat variasi nilai kekuatan tarik maksimum antar spesimen pada masing-masing komposisi yang perlu dicermati. Pada komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10%, spesimen 3 menghasilkan nilai UTS tertinggi (60,93 MPa), jauh melampaui spesimen 1 (45,98 MPa) dan spesimen 2 (42,97 MPa), dengan rentang sebesar ± 18 MPa dari rata-rata. Variasi serupa juga terjadi pada komposisi Aluminium 100%, dengan rentang nilai UTS antara 34,59–47,84 MPa. Sebaran ini mengindikasikan bahwa hasil pengecoran belum sepenuhnya homogen antar spesimen, sebagaimana telah disinggung pada bagian pengantar Bab IV kemungkinan disebabkan oleh perbedaan lokal tingkat porositas atau distribusi unsur paduan yang tidak seragam pada tiap spesimen, meskipun berasal dari proses peleburan dan penuangan yang sama.



Gambar 4. 17 Perbandingan Nilai UTS Dengan Kekuatan Minimum Antar Spesimen
(Sumber: Penulis, 2026)

Gambar 4.17 menunjukkan perbandingan nilai UTS (Ultimate Tensile Strength) hasil pengujian tarik antar spesimen untuk kedua komposisi material, terhadap garis standar kekuatan minimum sebesar 19 MPa. Pada komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10%, nilai UTS tiap spesimen berturut-turut sebesar 45,98 MPa, 42,967 MPa, dan 60,933 MPa, sedangkan pada komposisi Aluminium 100% diperoleh nilai sebesar 34,592 MPa, 39,242 MPa, dan 47,842 MPa. Seluruh nilai UTS pada ketiga spesimen dari kedua komposisi tersebut berada jauh di atas garis standar kekuatan minimum, yang menunjukkan bahwa hasil pengujian konsisten memenuhi syarat kekuatan minimum yang disyaratkan.



Gambar 4. 18 Perbandingan Nilai UTS Dengan Kekuatan Minimum Antar Komposisi
(Sumber: Penulis, 2026)

Grafik berikutnya pada Gambar 4.18 menampilkan perbandingan nilai rata-rata stress hasil uji tarik antar komposisi terhadap standar kekuatan minimum. Komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10% menghasilkan nilai rata-rata stress sebesar 49,961 MPa, sedangkan komposisi Aluminium 100% menghasilkan nilai sebesar 40,558 MPa. Kedua nilai rata-rata tersebut berada jauh di atas standar minimum sebesar 19 MPa, dengan komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10% menunjukkan margin keamanan yang lebih besar dibandingkan Aluminium 100%. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan unsur Kuningan sebesar 10% memberikan kontribusi terhadap peningkatan kekuatan tarik material dibandingkan dengan Aluminium murni.

Nilai UTS yang diperoleh pada penelitian ini (40,56–49,96 MPa) tergolong jauh lebih rendah dibandingkan rentang kekuatan tarik paduan aluminium pada umumnya, yaitu 200–600 MPa (Ruwana & Sudiasa, 2017), maupun hasil penelitian Wisnujati & Sepriansyah (2018) yang melaporkan kekuatan tarik aluminium cor hingga 774,74 N/mm² pada kondisi cetakan optimal (suhu 450°C). Demikian pula, nilai UTS kuningan hasil penelitian ini berada jauh di bawah kekuatan tarik kuningan 60/40 sebesar 260,12 N/mm² yang dilaporkan Setiawan (2021).

Kesenjangan yang signifikan ini kemungkinan besar disebabkan oleh kondisi proses pengecoran pada penelitian ini yang belum dikontrol secara ketat atau berbeda sebagaimana pada penelitian rujukan. Beberapa faktor yang diduga berkontribusi antara lain:

- (1) Tidak dilakukannya kontrol suhu cetakan maupun suhu penuangan secara presisi, sehingga laju pendinginan tidak seragam dan berpotensi menghasilkan struktur butir kasar (coarse grain);
- (2) Tingkat porositas yang relatif tinggi akibat gas terperangkap selama proses penuangan pada cetakan pasir, yang mengurangi luas penampang efektif spesimen dalam menahan beban tarik;
- (3) Tidak dilakukannya proses perlakuan panas (heat treatment) pasca-pengecoran yang pada penelitian rujukan terbukti meningkatkan kekuatan tarik secara signifikan;
- (4) Perbedaan metode pengecoran dimana pada sumber literasi metode yang digunakan merupakan metode *die casting* bukan *sand casting*;

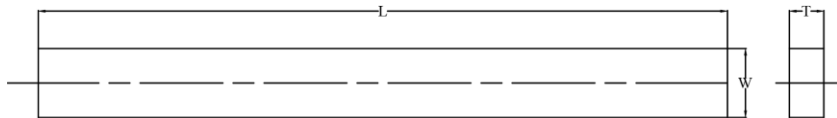
- (5) Perbedaan material yang digunakan dimana pada sumber literasi material yang digunakan merupakan material bersertifikat sedangkan material yang digunakan pada penelitian ini merupakan material bekas dilakukan peleburan ulang sehingga komposisi materialnya akan terkontaminasi dengan unsur lain yang menyebabkan penurunan kekuatan hasil pengecoran; serta,
- (6) Belum diverifikasinya komposisi kimia aktual hasil peleburan terhadap komposisi rancangan, sehingga kemungkinan penyimpangan kandungan unsur paduan turut memengaruhi hasil.

Sebagai catatan, penelitian ini tidak melakukan pengujian metalografi maupun uji komposisi kimia untuk memverifikasi penyebab pasti dari kesenjangan tersebut, sehingga faktor-faktor di atas bersifat dugaan berdasarkan kondisi proses fabrikasi yang telah dijelaskan pada Bab III, bukan hasil pembuktian langsung. Verifikasi lebih lanjut melalui pengujian tersebut disarankan untuk penelitian selanjutnya.

4.4 Hasil Pengujian Bending

Pengujian bending ini dilakukan untuk mendapatkan nilai tegangan lentur dan regangan lentur dari material hasil pengecoran logam. Pengujian ini dilakukan berdasarkan standart ASTM E290. Berbeda dengan pengujian tarik pada Sub-bab 4.3, hasil pengujian bending pada penelitian ini tidak divalidasi terhadap nilai tegangan kerja minimum yang dihitung pada Sub-bab 4.2.1. Hal ini disebabkan oleh sifat dasar ASTM E290 sebagai metode uji ductility yang bersifat kualitatif (*non-quantitative*), sebagaimana dinyatakan standar tersebut secara eksplisit pada hasil evaluasi keuletan lentur berupa sudut lentur (*angle of bend*) dan kondisi retak, bukan nilai tegangan dalam satuan MPa. Karena tegangan kerja minimum pada Sub-bab 4.2.1 dinyatakan dalam satuan MPa, sedangkan hasil pengujian bending berupa besaran sudut ($^{\circ}$), kedua besaran tersebut tidak dapat dibandingkan secara langsung tanpa persamaan konversi kuantitatif yang valid. Oleh karena itu, evaluasi hasil uji bending pada penelitian ini dilakukan secara komparatif antar spesimen dan antar komposisi material (Sub-bab 4.4.3-4.4.4), bukan terhadap ambang batas kuantitatif seperti pada uji tarik.

Spesimen uji tarik dibuat dengan ukuran sesuai standart ASTM E-290 seperti pada gambar 4.19



Gambar 4. 19 Dimensi Spesimen Uji Bending
(Sumber: Penulis, 2026)

Keterangan:

1. Overall Length (L) : 200 mm
2. Width (W) : 20 mm
3. Thickness (T) : 10 mm

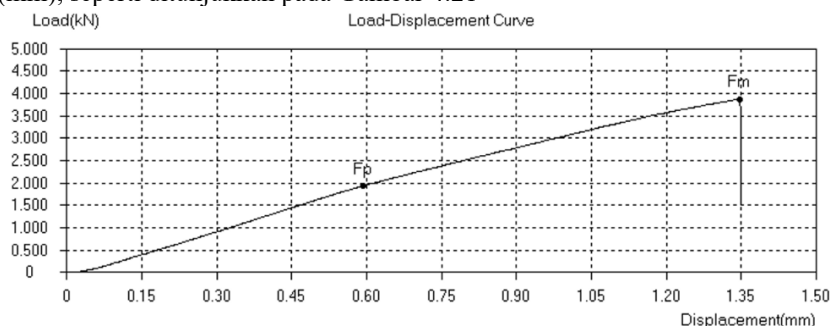
4.4.1 Perhitungan Uji Bending Komposisi Aluminium 90% - Kuningan 10%



Gambar 4. 20 Spesimen Hasil Uji Bending Komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10%
(Sumber: Penulis, 2026)

1. Perhitungan hasil pengujian bending Komposisi Aluminium 90% - Kuningan 10% spesimen 1

Pengujian bending pada spesimen 1 dilakukan menggunakan konfigurasi *Guided-bend, U-bend Test* sesuai ASTM E290, dengan spesimen ditempatkan di atas dua tumpuan berjarak 130 mm, kemudian dibebani melalui plunger di titik tengah bentang. Data hasil pengukuran disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara penambahan beban (*load*) dengan *displacement* spesimen (mm), seperti ditunjukkan pada Gambar 4.21



Gambar 4. 21 Grafik Load-Displacement Hasil Uji Bending Komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10% Spesimen 1
(Sumber: Penulis, 2026)

Setelah dilaksanakan pengujian bending pada spesimen 1, diperoleh data hasil pengukuran yang disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara penambahan beban (*load*) dengan *displacement* spesimen (mm), seperti ditunjukkan pada Gambar 4.21. Kurva menunjukkan tiga fase yang berbeda: pada tahap awal pembebanan (0-0,15 mm), kemiringan kurva relatif landai, diduga merupakan fase penyesuaian kontak awal antara permukaan spesimen dengan plunger dan tumpuan. Selanjutnya, beban meningkat secara hampir linier terhadap *displacement* hingga mencapai titik sekitar 0,60 mm ($\pm 1,9$ -2,0 kN), yang mengindikasikan awal terjadinya deformasi plastis. Fase ketiga berlangsung dari titik tersebut hingga beban maksimum (F_m) sebesar 3,873 kN pada *displacement* sebesar 1,346 mm.

Segera setelah beban puncak tercapai, kurva menunjukkan penurunan yang tajam dan mendadak, alih-alih penurunan bertahap yang umum menyertai deformasi plastis lanjutan. Pola ini mengindikasikan bahwa kegagalan pada spesimen 1 bersifat mendadak (*brittle-like failure*) meskipun material sempat mengalami sejumlah deformasi plastis sebelum retak terbentuk sebuah kombinasi yang menunjukkan keuletan terbatas pada tingkat regangan permukaan yang tinggi.

Pengujian dihentikan pada sudut lentur sebesar 3° setelah teramati retak pada permukaan cembung spesimen, sesuai prosedur ASTM E290 yang mensyaratkan penghentian pengujian segera setelah retak signifikan muncul selama pembebanan berlangsung.



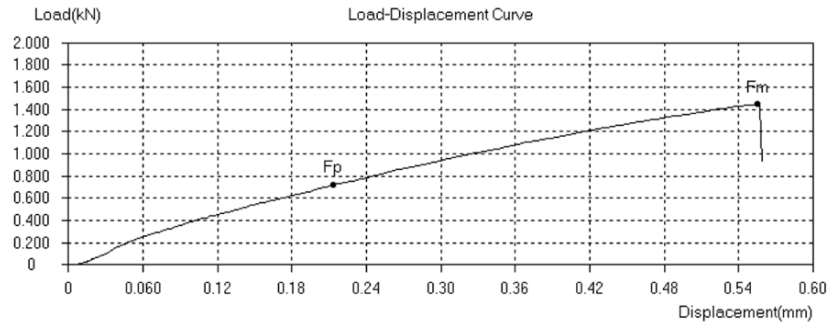
Gambar 4. 22 Visual Retak Spesimen 1 Paduan Aluminium-Kuningan
(Sumber: Penulis, 2026)

Pemeriksaan visual pada Gambar 4.22 menunjukkan retak melintang pada area yang mengalami tegangan tarik maksimum (permukaan cembung, tepat di bawah titik kontak plunger), tanpa disertai pemisahan total (complete fracture) pada spesimen. Pengujian dihentikan pada sudut lentur sebesar 3° saat teramati retak pertama pada permukaan cembung spesimen, ditandai dengan penurunan tajam pada kurva load-displacement segera setelah beban puncak (F_m) tercapai sesuai pendekatan penentuan sudut lentur berdasarkan titik munculnya retak pertama yang umum digunakan dalam karakterisasi keuletan paduan aluminium (ASTM E290 - *Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility*, 2022). Sudut yang tergolong sangat kecil ini mengindikasikan tingkat keuletan lentur material yang rendah.

Kapasitas beban yang cukup tinggi (3,873 kN) sebelum kegagalan mengindikasikan bahwa secara struktural spesimen ini masih mampu menahan gaya lentur yang relatif besar, namun kegagalan pada sudut yang sangat kecil menunjukkan bahwa regangan permukaan kritis untuk inisiasi retak tercapai jauh lebih cepat dibandingkan yang diharapkan pada material paduan aluminium yang homogen mengindikasikan kemungkinan adanya cacat mikrostruktur (porositas atau ketidakhomogenan lokal) pada lapisan permukaan spesimen, sebagaimana telah disinggung pada bagian pengantar Bab IV.

2. Perhitungan hasil pengujian bending Komposisi Aluminium 90% - Kuningan 10% spesimen 2

Pengujian bending pada spesimen 2 dilakukan menggunakan konfigurasi *Guided-bend*, *U-bend Test* sesuai ASTM E290, dengan spesimen ditempatkan di atas dua tumpuan berjarak 130 mm, kemudian dibebani melalui plunger di titik tengah bentang. Data hasil pengukuran disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara penambahan beban (*load*) dengan *displacement* spesimen (mm), seperti ditunjukkan pada Gambar 4.23



Gambar 4. 23 Grafik Load-Displacement Hasil Uji Bending Komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10% Spesimen 2
(Sumber: Penulis, 2026)

Setelah dilaksanakan pengujian bending pada spesimen 2, diperoleh data hasil pengukuran yang disajikan pada Gambar 4.23. Spesimen 2 menunjukkan pola kurva yang secara kualitatif serupa dengan spesimen 1 (peningkatan bertahap diikuti penurunan tajam pasca-puncak), namun dengan magnitudo yang jauh lebih rendah beban maksimum tercapai hanya sebesar 1,455 kN pada displacement sebesar 0,554 mm. Nilai ini 62,4% lebih rendah dari beban maksimum spesimen 1 (3,873 kN), dan displacement yang dicapai juga 58,8% lebih kecil.



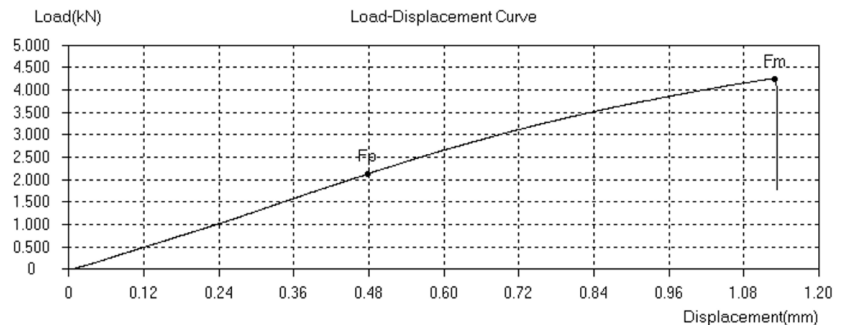
Gambar 4. 24 Visual Retak Spesimen 2 Paduan Aluminium-Kuningan
(Sumber: Penulis, 2026)

Pengujian dihentikan pada sudut lentur sebesar 2° — sudut terkecil di antara ketiga spesimen — saat teramati retak pertama pada permukaan cembung (Gambar 4.24). Sudut yang sangat kecil ini, dikombinasikan dengan kapasitas beban terendah, mengindikasikan tingkat keuletan lentur yang paling rendah di antara ketiga spesimen pada komposisi ini.

Kombinasi beban maksimum terendah dengan sudut lentur terkecil pada spesimen 2 ini konsisten secara mekanis: material pada titik pengambilan sampel ini gagal pada tingkat pembebanan sekaligus deformasi yang paling rendah di antara ketiga spesimen, mengindikasikan kemungkinan tingkat porositas atau ketidakhomogenan lokal yang lebih tinggi dibandingkan spesimen 1 dan 3 pada titik tersebut. Pola ini konsisten dengan variasi hasil uji tarik pada komposisi yang sama (Sub-bab 4.3.4), yang turut menunjukkan sebaran nilai UTS antar spesimen akibat ketidakhomogenan hasil pengecoran.

3. Perhitungan hasil pengujian bending Komposisi Aluminium 90% - Kuningan 10% spesimen 3

Pengujian bending pada spesimen 3 dilakukan menggunakan konfigurasi *Guided-bend*, *U-bend Test* sesuai ASTM E290, dengan spesimen ditempatkan di atas dua tumpuan berjarak 130 mm, kemudian dibebani melalui plunger di titik tengah bentang. Data hasil pengukuran disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara penambahan beban (*load*) dengan *displacement* spesimen (mm), seperti ditunjukkan pada Gambar 4.25



Gambar 4. 25 Grafik Load-Displacement Hasil Uji Bending Komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10% Spesimen 3
(Sumber: Penulis, 2026)

Setelah dilaksanakan pengujian bending pada spesimen 3, diperoleh data hasil pengukuran yang disajikan pada Gambar 4.25. Spesimen 3 mencapai beban maksimum tertinggi di antara ketiga spesimen, yaitu sebesar 4,255 kN pada displacement sebesar 1,129 mm, 9,9% lebih tinggi dari spesimen 1 dan 192,4% lebih tinggi dari spesimen 2.



Gambar 4. 26 Visual Retak Spesimen 3 Paduan Aluminium-Kuningan
(Sumber: Penulis, 2026)

Pengujian dihentikan pada sudut lentur sebesar 4° , sudut terbesar di antara ketiga spesimen, sejalan dengan kapasitas bebannya yang juga paling tinggi. Pemeriksaan visual pada Gambar 4.26 menunjukkan retak pertama pada permukaan cembung tanpa pemisahan total. Meskipun demikian, sudut 4° ini tetap tergolong kecil secara keseluruhan, menunjukkan bahwa bahkan spesimen dengan performa terbaik pada komposisi ini masih memiliki keuletan lentur yang terbatas.

Konsistensi antara kapasitas beban tertinggi dan sudut lentur terbesar pada spesimen 3 mengindikasikan bahwa material pada titik pengambilan sampel ini memiliki kualitas hasil pengecoran yang relatif lebih baik (dengan dugaan lebih homogen, porositas lebih rendah) dibandingkan kedua spesimen

lainnya, sehingga mampu menahan deformasi lentur sedikit lebih besar sebelum regangan permukaan kritis untuk inisiasi retak tercapai.

Secara keseluruhan, ketiga spesimen komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10% menunjukkan pola kegagalan yang konsisten secara kualitatif retak pertama muncul pada sudut lentur yang sangat kecil (2° - 4°), mengindikasikan tingkat keuletan lentur yang rendah pada seluruh titik pengambilan sampel. Terdapat korelasi yang konsisten antara kapasitas beban dan sudut lentur yang dicapai: spesimen dengan beban maksimum lebih tinggi (spesimen 1 dan 3) juga mencapai sudut lentur yang lebih besar sebelum retak pertama muncul, sedangkan spesimen dengan beban maksimum terendah (spesimen 2) gagal pada sudut terkecil. Pola ini mengindikasikan bahwa variasi tingkat keuletan lentur antar spesimen berkaitan erat dengan variasi kualitas lokal hasil pengecoran. Perbandingan menyeluruh antar kedua komposisi serta kaitannya dengan mekanisme kegagalan akan dibahas lebih lanjut pada Sub-bab 4.4.3 dan 4.4.4.

4.4.2 Perhitungan Uji Bending Komposisi Aluminium 100%

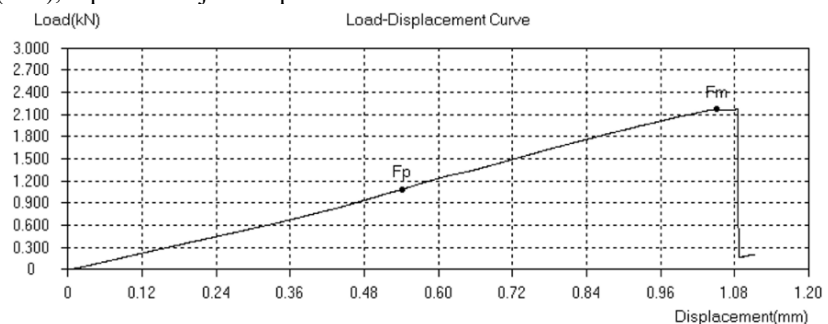
Pengujian bending pada komposisi Aluminium 100% dilakukan dengan konfigurasi dan prosedur yang sama seperti komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10%, yaitu Guided-bend, U-bend Test sesuai ASTM E290 dengan jarak antar tumpuan 130 mm.



Gambar 4. 27 Spesimen Hasil Uji Bending Komposisi Aluminium 100%
(Sumber: Penulis, 2026)

1. Perhitungan hasil pengujian bending Aluminium 100% spesimen 1

Pengujian bending pada spesimen 1 dilakukan menggunakan konfigurasi Guided-bend, U-bend Test sesuai ASTM E290, dengan spesimen ditempatkan di atas dua tumpuan berjarak 130 mm, kemudian dibebani melalui plunger di titik tengah bentang. Data hasil pengukuran disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara penambahan beban (load) dengan displacement spesimen (mm), seperti ditunjukkan pada Gambar 4.28.



Gambar 4. 28 Grafik Load-Displacement Hasil Uji Bending Komposisi Aluminium 100% Spesimen 1
(Sumber: Penulis, 2026)

Setelah dilaksanakan pengujian bending pada spesimen 1, diperoleh data hasil pengukuran yang disajikan pada Gambar 4.28. Kurva load-displacement menunjukkan pola peningkatan beban secara bertahap hingga mencapai beban maksimum (F_m) sebesar 2,173 kN pada displacement sebesar 1,051 mm, diikuti penurunan tajam segera setelah beban puncak, pola yang konsisten dengan seluruh spesimen pada komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10% sebelumnya.

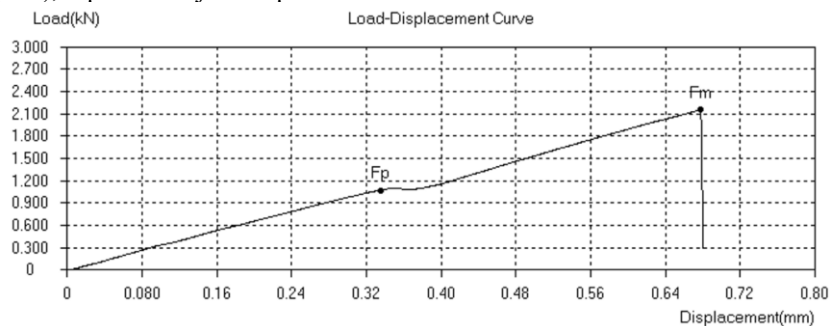


*Gambar 4. 29 Visual Retak Spesimen 1 Aluminium Murni
(Sumber: Penulis, 2026)*

Pengujian dihentikan pada sudut lentur sebesar 1° saat teramati retak pertama pada permukaan cembung spesimen (Gambar 4.29), ditandai dengan penurunan tajam pada kurva segera setelah beban puncak tercapai, tanpa disertai pemisahan total. Sudut yang sangat kecil ini bahkan lebih kecil dibandingkan seluruh spesimen komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10% (2° – 4°) mengindikasikan bahwa material dengan komposisi Aluminium 100% ini cenderung memiliki keuletan lentur yang lebih rendah dibandingkan komposisi dengan penambahan Kuningan.

2. Perhitungan hasil pengujian bending Aluminium 100% spesimen 2

Pengujian bending pada spesimen 2 dilakukan menggunakan konfigurasi Guided-bend, U-bend Test sesuai ASTM E290, dengan spesimen ditempatkan di atas dua tumpuan berjarak 130 mm, kemudian dibebani melalui plunger di titik tengah bentang. Data hasil pengukuran disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara penambahan beban (load) dengan displacement spesimen (mm), seperti ditunjukkan pada Gambar 4.30



*Gambar 4. 30 Grafik Load-Displacement Hasil Uji Bending Komposisi Aluminium 100% Spesimen 2
(Sumber: Penulis, 2026)*

Setelah dilaksanakan pengujian bending pada spesimen 2, diperoleh data hasil pengukuran yang disajikan pada Gambar 4.30. Spesimen 2 mencapai beban maksimum sebesar 2,158 kN hampir identik dengan spesimen 1 (selisih hanya 0,69%) namun pada displacement yang jauh lebih kecil, yaitu 0,678 mm, atau 35,5% lebih rendah dibandingkan spesimen 1.

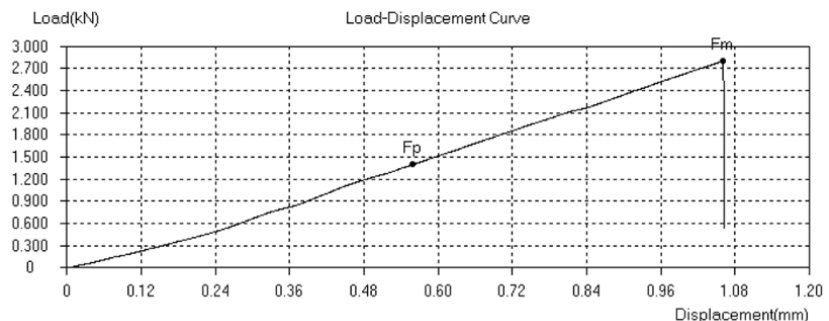


Gambar 4. 31 Visual Retak Spesimen 2 Aluminium Murni
(Sumber: Penulis, 2026)

Pengujian dihentikan pada sudut lentur sebesar 1° , sama seperti spesimen 1, saat teramati retak pertama pada permukaan cembung (Gambar 4.31). Kombinasi antara kapasitas beban yang hampir sama namun displacement yang jauh lebih kecil ini menunjukkan bahwa spesimen 2 berperilaku lebih kaku (stiffer) dan lebih getas, material mencapai tingkat tegangan yang sebanding dengan spesimen 1, tetapi dengan deformasi yang jauh lebih sedikit sebelum retak muncul, mengindikasikan kemungkinan tingkat porositas atau ketidakhomogenan mikrostruktur yang berbeda pada titik pengambilan sampel ini meskipun berasal dari komposisi dan proses pengecoran yang sama.

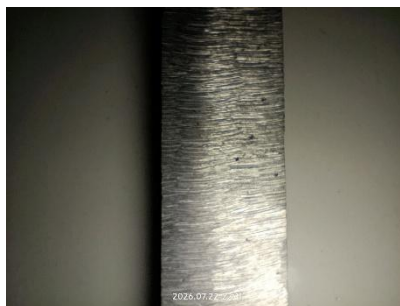
3. Perhitungan hasil pengujian bending Aluminium 100% spesimen 3

Pengujian bending pada spesimen 3 dilakukan menggunakan konfigurasi Guided-bend, U-bend Test sesuai ASTM E290, dengan spesimen ditempatkan di atas dua tumpuan berjarak 130 mm, kemudian dibebani melalui plunger di titik tengah bentang. Data hasil pengukuran disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara penambahan beban (load) dengan displacement spesimen (mm), seperti ditunjukkan pada Gambar 4.32



Gambar 4. 32 Grafik Load-Displacement Hasil Uji Bending Komposisi Aluminium 100% Spesimen 3
(Sumber: Penulis, 2026)

Setelah dilaksanakan pengujian bending pada spesimen 3, diperoleh data hasil pengukuran yang disajikan pada Gambar 4.32. Spesimen 3 menghasilkan performa tertinggi pada komposisi ini, dengan beban maksimum sebesar 2,805 kN dan 29,1% lebih tinggi dibandingkan spesimen 1 dan 30,0% lebih tinggi dibandingkan spesimen 2, pada displacement sebesar 1,061 mm, sebanding dengan spesimen 1.



Gambar 4. 33 Visual Retak Spesimen 3 Aluminium Murni

Pengujian dihentikan pada sudut lentur sebesar 2° , sudut terbesar pada komposisi ini, saat teramati retak pertama pada permukaan cembung (Gambar 4.33). Konsisten dengan pola yang teramati pada komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10%, spesimen dengan kapasitas beban tertinggi pada komposisi ini juga mencapai sudut lentur terbesar sebelum retak muncul, mengindikasikan kualitas hasil pengecoran yang relatif lebih baik pada titik pengambilan sampel spesimen 3.

Secara keseluruhan, ketiga spesimen komposisi Aluminium 100% menunjukkan sudut lentur yang secara konsisten sangat kecil (1° – 2°), bahkan cenderung lebih rendah dibandingkan komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10% (2° – 4°). Pola korelasi antara kapasitas beban dan sudut lentur yang teramati pada komposisi sebelumnya juga berlaku di sini. Spesimen dengan beban maksimum tertinggi (spesimen 3) mencapai sudut lentur terbesar, sedangkan spesimen dengan displacement terkecil sebelum retak (spesimen 2) menunjukkan karakter yang lebih kaku dan getas meskipun kapasitas bebannya sebanding dengan spesimen 1.

Perbandingan sudut lentur antar kedua komposisi ini mengindikasikan bahwa penambahan unsur Kuningan tidak hanya meningkatkan kekuatan dan keuletan tarik (sebagaimana dibahas pada Sub-bab 4.3.4), tetapi juga turut memperbaiki keuletan lentur material, meskipun peningkatan tersebut belum mengubah karakteristik dasar material yang tetap menunjukkan kegagalan pada sudut lentur yang relatif kecil di kedua komposisi. Perbandingan menyeluruh antar kedua komposisi serta kaitannya dengan mekanisme kegagalan material secara metalurgi akan dibahas lebih lanjut pada Sub-bab 4.4.3 dan 4.4.4.

4.4.3 Hasil Uji Bending

1. Hasil Uji Bending Komposisi Aluminium 90% - Kuningan 10%

*Tabel 4. 13 Tabel Hasil Uji Bending Aluminium 90%-Kuningan 10%
(Sumber: Penulis, 2026)*

Rata-rata Uji Bending Aluminium 90%-Kuningan 10%				
Spesimen	Load Max (kN)	D Max (mm)	Sudut Lentur ($^\circ$)	Kondisi Retak
1	3,873	1,346	3	Retak pada permukaan cembung, tanpa pemisahan
2	1,455	0,554	2	Retak pada permukaan cembung, tanpa pemisahan

Rata-rata Uji Bending Aluminium 90%-Kuningan 10%				
Spesimen	Load Max (kN)	D Max (mm)	Sudut Lentur (°)	Kondisi Retak
3	4,225	1,129	4	Retak pada permukaan cembung, tanpa pemisahan
Rata-Rata	3,194	1,010	3	-

2. Hasil Uji Bending Komposisi Aluminium 100%

*Tabel 4. 14 Tabel Hasil Rata-rata Uji Bending Aluminium 100%
(Sumber: Penulis, 2026)*

Rata-Rata Uji Bending Aluminium 100%				
Spesimen	Load Max (kN)	D Max (mm)	Sudut Lentur (°)	Kondisi Retak
1	2,173	1,051	1	Retak pada permukaan cembung, tanpa pemisahan
2	2,158	0,678	1	Retak pada permukaan cembung, tanpa pemisahan
3	2,805	1,061	2	Retak pada permukaan cembung, tanpa pemisahan
Rata-Rata	2,378	0,930	1,330	-

3. Hasil rata-rata uji Bending antara komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10% dengan komposisi aluminium 100%

*Tabel 4. 15 Tabel hasil rata-rata Uji bending Antar Komposisi
(Sumber: Penulis, 2026)*

Komposisi	Load Max (kN)	D Max (mm)	Sudut Lentur (°)
Aluminium 90%-Kuningan 10%	3,194	1,010	3
Aluminium 100%	2,378	0,930	1,33

Dari pengujian bending terhadap dua komposisi material, spesimen Aluminium 90%-Kuningan 10% menghasilkan rata-rata load max sebesar 3,194 kN, displacement max rata-rata 1,010 mm, dan sudut lentur rata-rata 3° sebelum retak pertama muncul. Sementara spesimen Aluminium 100% menghasilkan rata-rata load max sebesar 2,379 kN, displacement max rata-rata 0,930 mm, dan sudut lentur rata-rata hanya 1,33°.

Perbandingan ini menunjukkan bahwa komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10% unggul di seluruh parameter dibandingkan Aluminium 100%, baik dari sisi kapasitas beban (34,3% lebih tinggi), displacement sebelum retak (8,6% lebih tinggi), maupun sudut lentur yang dicapai (125% lebih besar). Seluruh enam spesimen pada kedua komposisi, tanpa terkecuali, mengalami retak pada sudut lentur yang tergolong sangat kecil dan menunjukkan pola kegagalan yang serupa, kurva load-displacement naik hingga beban puncak, kemudian turun tajam bersamaan dengan munculnya retak pertama. Kaitan mekanisme kegagalan ini

dengan hasil uji tarik serta penjelasan metalurgi yang mendasarinya akan dibahas mendalam pada Sub-bab 4.4.4.

4.4.4 Analisis Hasil Uji Bending

Pengujian bending dilakukan untuk mengevaluasi keuletan (ductility) material propeller terhadap beban lentur, sebagai pelengkap karakterisasi kekuatan tarik yang telah dibahas pada Sub-bab 4.3. Berdasarkan hasil pada Sub-bab 4.4.1-4.4.3, seluruh enam spesimen dari kedua komposisi material menunjukkan pola kegagalan yang konsisten, yaitu retak pertama muncul pada sudut lentur yang sangat kecil (1° - 4°), jauh lebih rendah dari yang diharapkan pada material logam pada umumnya, disertai penurunan tajam dan mendadak pada kurva load-displacement segera setelah beban puncak tercapai.

1. Kesenjangan Keuletan Tarik dan Keuletan Lentur

Temuan yang paling mencolok dari pengujian ini adalah kontras antara perilaku material pada uji tarik dan uji bending. Pada uji tarik (Sub-bab 4.3), material menunjukkan regangan maksimum yang cukup baik (1,8%-4,0%), namun pada uji bending material yang sama justru gagal pada sudut lentur yang sangat kecil (1° - 4°).

Perbedaan ini dapat dijelaskan secara mekanika: pada uji tarik, regangan terdistribusi merata di sepanjang gauge length, sehingga cacat lokal tidak serta-merta menentukan kegagalan. Sebaliknya, pada uji bending, regangan terkonsentrasi tajam pada permukaan terluar di sekitar titik kontak plunger, sehingga sudut lentur yang kecil sekalipun sudah menghasilkan regangan permukaan lokal yang tinggi. Apabila permukaan tersebut memiliki cacat pengecoran seperti porositas atau ketidakaturan hasil finishing, retak akan terinisiasi dengan cepat begitu regangan lokal kritis terlampaui, jauh sebelum material sempat berdeformasi plastis secara signifikan seperti pada uji tarik.

2. Korelasi Kapasitas Beban dan Sudut Lentur Antar Spesimen

Pada kedua komposisi, teramati pola yang konsisten: spesimen dengan kapasitas beban maksimum (load max) yang lebih tinggi juga cenderung mencapai sudut lentur yang lebih besar sebelum retak muncul. Pada komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10%, spesimen 3 (4,255 kN) mencapai sudut 4° , sedangkan spesimen 2 (1,455 kN) hanya mencapai 2° . Pola serupa teramati pada komposisi Aluminium 100%, di mana spesimen 3 (2,805 kN) mencapai sudut 2° , lebih besar dibandingkan spesimen 1 dan 2 (masing-masing 1°). Korelasi ini mengindikasikan bahwa variasi keuletan lentur antar spesimen pada komposisi yang sama bukan disebabkan oleh perbedaan komposisi kimia, melainkan oleh variasi kualitas lokal hasil pengecoran. Kemungkinan besar berupa tingkat porositas atau homogenitas mikrostruktur yang berbeda pada tiap titik pengambilan sampel, sebagaimana telah dibahas kemungkinannya pada paragraf pengantar Bab IV.

Salah satu temuan yang perlu dicermati adalah spesimen 2 komposisi Aluminium 100%, yang mencapai kapasitas beban hampir setara dengan spesimen 1 (2,158 kN berbanding 2,173 kN) namun dengan displacement yang jauh lebih kecil (0,678 mm berbanding 1,051 mm). Kondisi ini mengindikasikan bahwa spesimen 2 berperilaku lebih kaku dan lebih getas dibandingkan spesimen 1, meskipun kapasitas menahan bebannya sebanding. Kemungkinan mencerminkan perbedaan struktur mikro lokal yang memengaruhi tingkat keuletan tanpa memengaruhi kekuatan secara signifikan.

3. Pengaruh Penambahan Unsur Kuningan

Perbandingan antar komposisi menunjukkan bahwa komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10% secara konsisten unggul dibandingkan Aluminium 100% pada seluruh parameter. Kapasitas beban rata-rata 34,3% lebih tinggi, displacement rata-rata 8,6% lebih tinggi, dan sudut lentur rata-rata 125% lebih besar (3° berbanding $1,33^\circ$). Pola ini sejalan dengan hasil uji tarik pada Sub-bab 4.3.4, yang juga menunjukkan keunggulan komposisi Aluminium 90%-Kuningan 10% baik dari sisi kekuatan maupun keuletan. Dengan demikian, penambahan unsur Kuningan tidak hanya memperbaiki kekuatan dan keuletan material terhadap beban tarik searah, tetapi juga turut meningkatkan kemampuan material menahan konsentrasi regangan pada kondisi pembebanan lentur meskipun peningkatan tersebut belum cukup signifikan untuk mengubah karakteristik dasar material yang tetap menunjukkan keuletan lentur yang rendah pada kedua komposisi.

4. Keterbatasan Pengukuran

Perlu dicatat bahwa sudut lentur pada penelitian ini diukur pasca-pengujian menggunakan busur derajat pada spesimen yang telah dilepas dari mesin uji, sehingga nilai yang dilaporkan berpotensi sedikit lebih besar dari sudut sesungguhnya saat pembebanan berlangsung akibat efek springback (ASTM E290 - Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility, 2022). Meskipun demikian, mengingat skala sudut yang diamati sangat kecil (1° - 4°), efek springback diperkirakan tidak mengubah kesimpulan mendasar bahwa keuletan lentur material pada penelitian ini tergolong rendah pada kedua komposisi.