

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

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

Pada penelitian ini, hasil cor yang sempurna didefinisikan sebagai produk pengecoran yang memiliki struktur dan komposisi sesuai dengan rancangan, tanpa cacat pengecoran yang signifikan sehingga mampu menghasilkan sifat mekanik yang optimal. Komposisi kuningan 100% hasil cor yang sempurna ditandai dengan terbentuknya struktur kuningan yang seragam, bebas dari porositas, retak, ronggo penyusutan (*shrinkage cavity*), maupun inklusi yang dapat menjadi titik awal kegagalan material. Pada komposisi kuningan 90% - aluminium 10%, hasil cor yang sempurna ditandai dengan terdistribusinya unsur aluminium secara homogen di dalam matriks kuningan tanpa segregasi komposisi, sehingga terbentuk struktur paduan yang seragam dengan porositas yang rendah. Homogenitas distribusi aluminium diperlukan agar seluruh bagian material memiliki karakteristik mekanik yang relatif sama, sedangkan porositas yang rendah akan mempertahankan luas penampang efektif material sehingga kemampuan menahan beban tidak berkurang.

Kriteria yang digunakan untuk menilai tingkat kesempurnaan hasil pengecoran meliputi:

1. Homogenitas struktur mikro, yang idealnya diverifikasi melalui pengujian metalografi untuk memastikan distribusi fasa dan unsur paduan berlangsung secara merata.
2. Kesesuaian komposisi kimia aktual terhadap komposisi rancangan, yaitu Kuningan 100% dan Kuningan 90%–Aluminium 10%, yang dapat dipastikan melalui pengujian komposisi kimia.
3. Tingkat porositas, yaitu jumlah dan ukuran rongga yang terbentuk selama proses pengecoran, karena porositas akan mengurangi luas penampang efektif material dan berpotensi menurunkan kekuatan tarik maupun kekuatan bending.

Pada penelitian ini, pengujian metalografi maupun pengujian komposisi kimia tidak dilakukan sehingga homogenitas distribusi aluminium di dalam paduan serta kesesuaian komposisi aktual hasil pengecoran tidak dapat diverifikasi secara langsung. Oleh karena itu, kualitas hasil pengecoran diasumsikan berdasarkan penerapan prosedur pengecoran yang sama pada seluruh spesimen. Kondisi tersebut menjadi salah satu faktor yang perlu dipertimbangkan dalam menginterpretasikan hasil pengujian tarik dan pengujian bending pada Subbab 4.3 dan 4.4, terutama apabila terdapat perbedaan nilai kekuatan mekanik antarspesimen dengan komposisi yang sama.

4.1 Hasil Perhitungan Perancangan Propeller

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

Nama	Ukuran
Length Over All (LOA)	9,00 m
Length Between Perpendicular (LPP)	7,61 m
Breadth (B)	1,15 m
Draft (T)	0,50 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

Berdasarkan data utama kapal tersebut dilakukan perhitungan hambatan kapal dengan menggunakan metode van oortmerssen, pada kecepatan kapal 6 knots didapatkan nilai hambatan kapal sebesar 855,614 N. Kemudian dari nilai hambatan kapal tersebut dilakukan perhitungan thrust dengan persamaan berikut:

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

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

$$T = 0,855614 \text{ kN}$$

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

Selanjutnya yaitu perhitungan propeller dilakukan untuk mendapatkan propeller yang tepat. Berdasarkan penelitian (Santosa 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 (Ae/Ao)

Untuk menghasilkan gaya dorong propeller yang besar, nilai Ae/Ao berkisar antara 0,30–1,05. Nilai yang dipilih adalah Ae/Ao = 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. *Speed of Advance* (Va)

Untuk mencari *Speed of Advance* (Va), diperlukan nilai wake fraction (w):

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

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

$$w = 0,075$$

$$Va = (1 - w) \times Vs$$

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

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

f. Koefisien Maju (J)

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

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

$$J = 0,61$$

g. Perhitungan Kavitasi

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

1. Menghitung Ae

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

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

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

$$Ae = Ao \times \left(\frac{Ae}{Ao} \right)$$

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

$$Ae = 0,057$$

2. Menghitung nilai Ap

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

$$\text{Dimana : } Ad = Ae$$

$$Ap = 0,05$$

3. Menghitung nilai $(Vr)^2$

$$Vr^2 = Va^2 + (0,7 \times \pi \times n \times D)^2$$

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

$$Vr^2 = 132,89$$

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}

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

$$\tau_{cal} = \frac{855,614}{0,05 \times 0,5 \times 1025 \times 132,89}$$

$$\tau_{cal} = 0,249$$

6. Menghitung nilai $\sigma_{0.7R}$

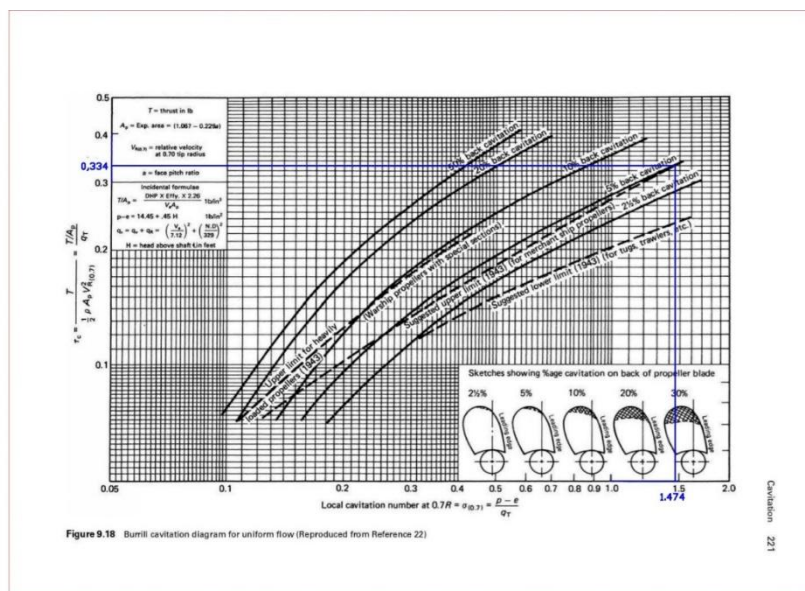
$$\sigma_{0.7R} = \frac{188.2 + 19.62h}{V_a^2 + 4.836(Dn)^2}$$

$$\sigma_{0.7R} = \frac{188.2 + 19.62 \times 0,39}{2,855^2 + 4.836(0,381 \times 13,33)^2}$$

$$\sigma_{0.7R} = 1,474$$

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.

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

$$0,249 < 0,334$$

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 Data Propeller
(Sumber: Santosa et al., 2022)

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 Hasil 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 akar daun.

a. Distribusi *thrust* pada daun propeller

Thrust total dibagi pada setiap daun propeller

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

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

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

b. Momen Lentur Pangkal Daun

Setelah didapatkan nilai thrust atau gaya yang bekerja pada tiap daun propeller, dilakukan perhitungan momen lentur pangkal daun 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)

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

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

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

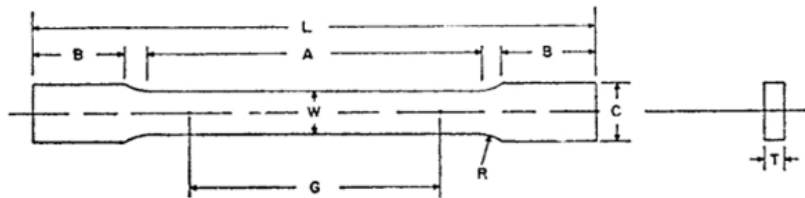
d. Tegangan Tarik Minimum ($\sigma_{minimum}$)

$$\begin{aligned}(\sigma_{minimum}) &= \frac{M_b}{W} \\(\sigma_{minimum}) &= \frac{32598,36}{1706,64} \\(\sigma_{minimum}) &= 19,10 \text{ N/mm}^2 \\(\sigma_{minimum}) &= 19,10 \text{ MPa}\end{aligned}$$

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 Bentuk dan Ukuran 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 |

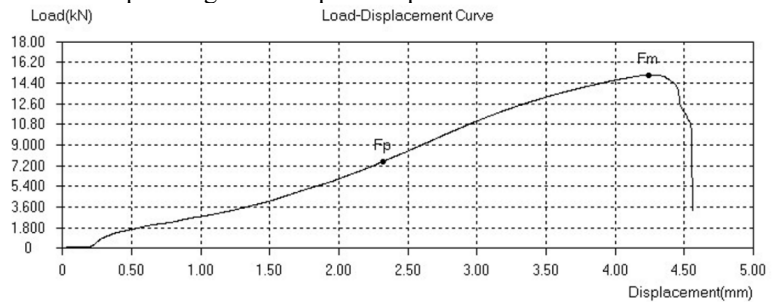
4.3.1 Perhitungan Uji Tarik Komposisi Kuningan 100%



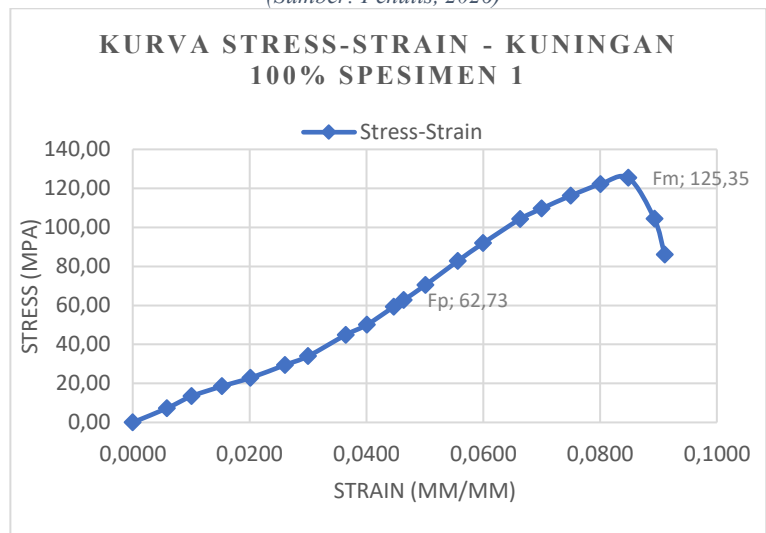
Gambar 4. 3 Hasil Spesimen Uji Tarik Kuningan 100%
(Sumber: Penulis, 2026)

1. Perhitungan hasil pengujian tarik kuningan 100% spesimen 1

Setelah dilakukan pengujian tarik pada spesimen 1 didapatkan data hasil pengukuran yang disajikan dalam bentuk grafik hubungan penambahan beban terhadap perpanjangan spesimen atau load-displacement yang ditunjukkan pada Gambar 4.4. Dari kurva yang ditampilkan dapat dilihat bahwa spesimen mengalami kenaikan beban secara bertahap sesuai dengan bertambahnya deformasi yang terjadi pada material sampai dengan mencapai titik patah.



Gambar 4. 4 Kurva Load-Displacement Uji Tarik Kuningan 100% Spesimen 1
(Sumber: Penulis, 2026)



Gambar 4. 5 Kurva Stress-Strain Uji Tarik Kuningan 100% Spesimen 1
(Sumber: Penulis, 2026)

Setelah didapatkan grafik load-displacement dari hasil pengujian tarik, kemudian data diubah secara manual untuk membuat kurva stress-strain. Proses ini dilakukan dengan membagi kurva menjadi 21 titik pengamatan dan persamaan yang telah ditetapkan digunakan untuk menghitung nilai tegangan (stress) dan regangan (strain) pada setiap titik. Hasil perhitungan manual tersebut disajikan dalam bentuk kurva stress-strain yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 Lalu data hasil perhitungan dirangkum secara lengkap pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 3 Stress-Strain Uji Tarik Kuningan 100% Spesimen 1
(Sumber: Penulis, 2026)

No.	Strain ϵ (mm/mm)	Stress σ (MPa)
P0	0,0000	0,00
P1	0,0058	7,22
P2	0,0101	13,43
P3	0,0153	18,53
P4	0,0201	22,83
P5	0,0261	29,45
P6	0,0300	33,93
P7	0,0364	44,83
P8	0,0401	50,03
P9	0,0447	59,33
Pyield	0,0464	62,73
P11	0,0501	70,42
P12	0,0556	82,77
P13	0,0600	91,89
P14	0,0663	104,23
P15	0,0700	109,60
P16	0,0750	116,23
P17	0,0800	122,13
Pmax	0,0849	125,35
P19	0,0893	104,42
P20	0,0911	85,98

- a. Luas Penampang Spesimen (mm^2)

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

$$A_0 = 12 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$$

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

Dimana:

W = Lebar Spesimen (mm)

T = Tebal Spesimen (mm)

A_0 = Luas Penampang (mm^2)

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

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

$$\sigma_{\text{yield}} = \frac{7527}{120}$$

$$\sigma_{\text{yield}} = 62,73 \text{ N/mm}^2$$

Dimana:

σ_{yield} = Regangan Luluh (N/mm^2)

P_{yield} = Tegangan Luluh (N)

A_0 = Luas Penampang (mm^2)

c. Maximum Stress (N/mm²)

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

$$\sigma_{max} = \frac{15042}{120}$$

$$\sigma_{max} = 125,35 \text{ N/mm}^2$$

Dimana:

$$\sigma_{max} = \text{Regangan Luluh (N/mm}^2\text{)}$$

$$P_{max} = \text{Tegangan Luluh (N)}$$

$$A_0 = \text{Luas Penampang (mm}^2\text{)}$$

d. Strain at Max Load (ε)

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

$$\varepsilon = \frac{4,243}{50} \times 100\%$$

$$\varepsilon = 8,486 \%$$

Dimana:

$$\varepsilon = \text{Regangan/strain saat load max (\%)}$$

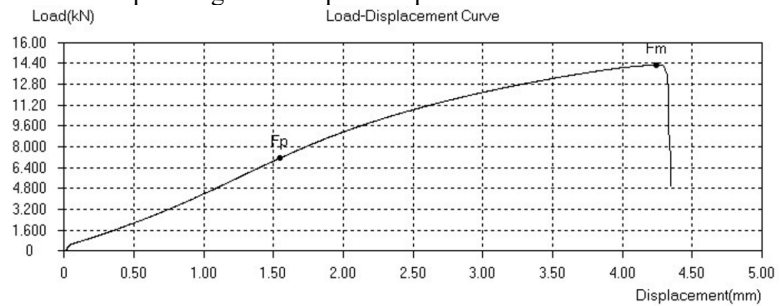
$$L_0 = \text{Panjang awal benda (mm)}$$

$$\delta = \text{Displacement saat load max (mm)}$$

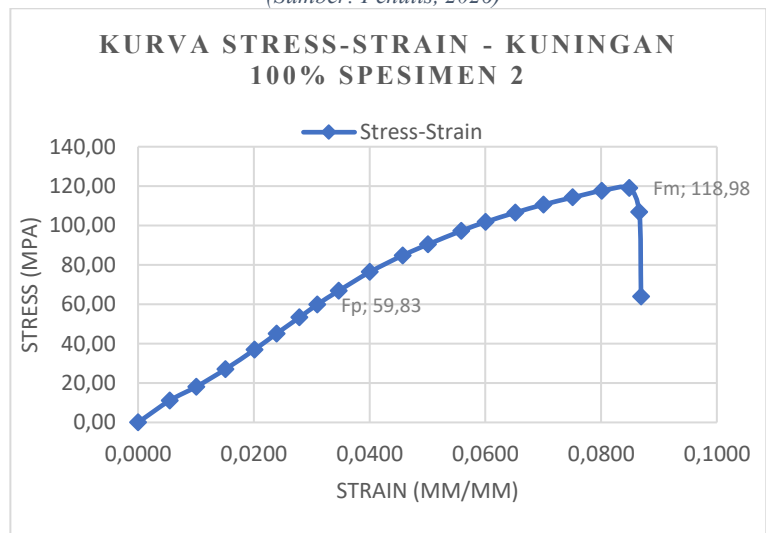
Berdasarkan hasil perhitungan di atas, diperoleh nilai yield stress pada spesimen sebesar 62,73 N/mm² yang didapat dari pembagian antara beban luluh (Pyield) sebesar 7527 N terhadap luas penampang awal (A₀) sebesar 120 mm². Selanjutnya, nilai maximum stress yang mampu ditahan oleh spesimen diperoleh sebesar 125,35 N/mm², yang merupakan hasil pembagian antara beban maksimum (P_{max}) sebesar 15042 N terhadap luas penampang awal yang sama. Adapun nilai strain pada saat beban maksimum (strain at max load) diperoleh sebesar 8,486%, yang dihitung berdasarkan perbandingan antara displacement saat beban maksimum (δ) sebesar 4,243 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 kuningan 100% spesimen 2

Setelah dilakukan pengujian tarik pada spesimen 2 didapatkan data hasil pengukuran yang disajikan dalam bentuk grafik hubungan penambahan beban terhadap perpanjangan spesimen atau load-displacement yang ditunjukkan pada Gambar 4.6. Dari kurva yang ditampilkan dapat dilihat bahwa spesimen mengalami kenaikan beban secara bertahap sesuai dengan bertambahnya deformasi yang terjadi pada material sampai dengan mencapai titik patah.



Gambar 4. 6 Kurva Load-Displacement Uji Tarik Kuningan 100% Spesimen 1
(Sumber: Penulis, 2026)



Gambar 4. 7 Kurva Stress-Strain Uji Tarik Kuningan 100% Spesimen 2
(Sumber: Penulis, 2026)

Setelah didapatkan grafik load-displacement dari hasil pengujian tarik, kemudian data diubah secara manual untuk membuat kurva stress-strain. Proses ini dilakukan dengan membagi kurva menjadi 21 titik pengamatan dan persamaan yang telah ditetapkan digunakan untuk menghitung nilai tegangan (stress) dan regangan (strain) pada setiap titik. Hasil perhitungan manual tersebut disajikan dalam bentuk kurva stress-strain yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 Lalu data hasil perhitungan dirangkum secara lengkap pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 4 Stress-Strain Uji Tarik Kuningan 100% Spesimen 2
(Sumber: Penulis, 2026)

No.	Strain ϵ (mm/mm)	Stress σ (MPa)
P0	0,0000	0,00
P1	0,0055	11,11
P2	0,0101	18,13
P3	0,0151	26,97
P4	0,0201	36,94
P5	0,0239	45,10
P6	0,0279	53,26
Pyield	0,0309	59,83
P8	0,0347	66,86
P9	0,0400	76,38
P10	0,0457	84,76
P11	0,0501	90,43
P12	0,0558	97,23
P13	0,0600	101,76
P14	0,0652	106,52
P15	0,0700	110,59
P16	0,0751	114,23
P17	0,0801	117,62
Pmax	0,0849	118,98
P19	0,0866	106,74
P20	0,0869	63,91

- a. Luas Penampang Spesimen (mm^2)

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

$$A_0 = 12 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$$

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

Dimana:

W = Lebar Spesimen (mm)

T = Tebal Spesimen (mm)

A_0 = Luas Penampang (mm^2)

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

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

$$\sigma_{\text{yield}} = \frac{7180}{120}$$

$$\sigma_{\text{yield}} = 59,83 \text{ N/mm}^2$$

Dimana:

σ_{yield} = Regangan Luluh (N/mm^2)

P_{yield} = Tegangan Luluh (N)

A_0 = Luas Penampang (mm^2)

c. Maximum Stress (N/mm²)

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

$$\sigma_{max} = \frac{14278}{120}$$

$$\sigma_{max} = 118,98 \text{ N/mm}^2$$

Dimana:

$$\sigma_{max} = \text{Regangan Luluh (N/mm}^2\text{)}$$

$$P_{max} = \text{Tegangan Luluh (N)}$$

$$A_0 = \text{Luas Penampang (mm}^2\text{)}$$

d. Strain at Max Load (ε)

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

$$\varepsilon = \frac{4,244}{50} \times 100\%$$

$$\varepsilon = 8,488 \%$$

Dimana:

$$\varepsilon = \text{Regangan/strain saat load max (\%)}$$

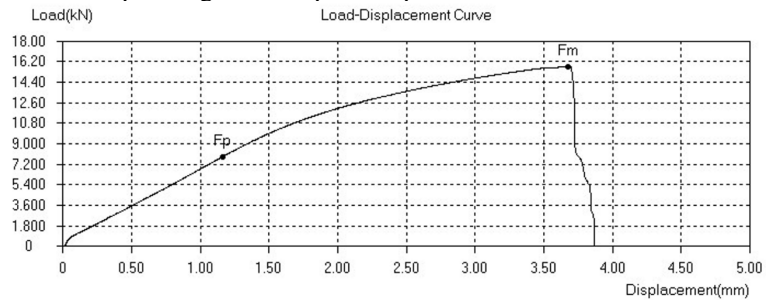
$$L_0 = \text{Panjang awal benda (mm)}$$

$$\delta = \text{Displacement saat load max (mm)}$$

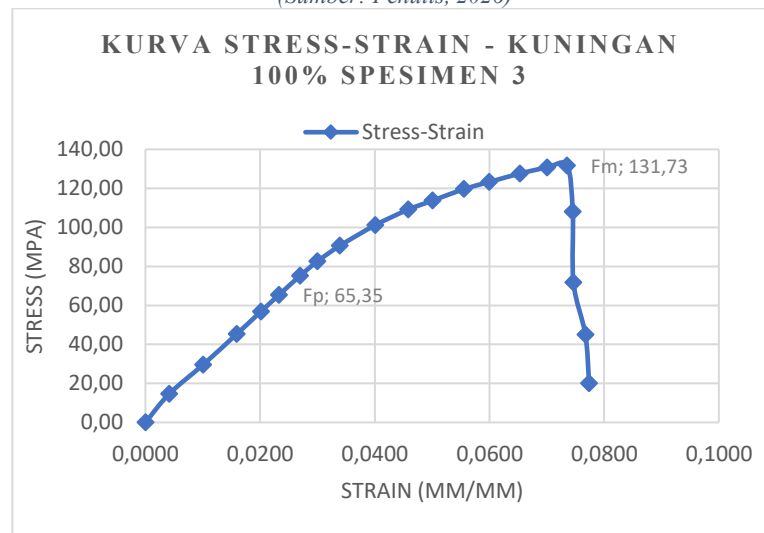
Berdasarkan hasil perhitungan di atas, diperoleh nilai yield stress pada spesimen sebesar 59,83 N/mm² yang didapat dari pembagian antara beban luluh (Pyield) sebesar 7180 N terhadap luas penampang awal (A₀) sebesar 120 mm². Selanjutnya, nilai maximum stress yang mampu ditahan oleh spesimen diperoleh sebesar 118,98 N/mm², yang merupakan hasil pembagian antara beban maksimum (P_{max}) sebesar 14278 N terhadap luas penampang awal yang sama. Adapun nilai strain pada saat beban maksimum (strain at max load) diperoleh sebesar 8,488%, yang dihitung berdasarkan perbandingan antara displacement saat beban maksimum (δ) sebesar 4,244 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.

3. Perhitungan hasil pengujian tarik kuningan 100% spesimen 3

Setelah dilakukan pengujian tarik pada spesimen 3 didapatkan data hasil pengukuran yang disajikan dalam bentuk grafik hubungan penambahan beban terhadap perpanjangan spesimen atau load-displacement yang ditunjukkan pada Gambar 4.8. Dari kurva yang ditampilkan dapat dilihat bahwa spesimen mengalami kenaikan beban secara bertahap sesuai dengan bertambahnya deformasi yang terjadi pada material sampai dengan mencapai titik patah.



Gambar 4. 8 Kurva Load-Displacement Uji Tarik Kuningan 100% Spesimen 3
(Sumber: Penulis, 2026)



Gambar 4. 9 Kurva Stress-Strain Uji Tarik Kuningan 100% Spesimen 3
(Sumber: Penulis, 2026)

Setelah didapatkan grafik load-displacement dari hasil pengujian tarik, kemudian data diubah secara manual untuk membuat kurva stress-strain. Proses ini dilakukan dengan membagi kurva menjadi 21 titik pengamatan dan persamaan yang telah ditetapkan digunakan untuk menghitung nilai tegangan (stress) dan regangan (strain) pada setiap titik. Hasil perhitungan manual tersebut disajikan dalam bentuk kurva stress-strain yang ditunjukkan pada Gambar 4.9. Lalu data hasil perhitungan dirangkum secara lengkap pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 5 Stress-Strain Uji Tarik Kuningan 100% Spesimen 3
(Sumber: Penulis, 2026)

No.	Strain ϵ (mm/mm)	Stress σ (MPa)
P0	0,0000	0,00
P1	0,0042	14,67
P2	0,0101	29,59
P3	0,0159	45,28
P4	0,0201	56,86
Pyield	0,0233	65,35
P6	0,0269	75,13
P7	0,0300	82,59
P8	0,0339	90,57
P9	0,0401	101,12
P10	0,0458	109,09
P11	0,0501	113,73
P12	0,0556	119,64
P13	0,0599	123,24
P14	0,0653	127,62
P15	0,0701	130,70
Pmax	0,0735	131,73
P17	0,0745	108,06
P18	0,0746	71,78
P19	0,0767	45,03
P20	0,0774	20,07

- a. Luas Penampang Spesimen (mm^2)

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

$$A_0 = 12 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$$

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

Dimana:

W = Lebar Spesimen (mm)

T = Tebal Spesimen (mm)

A_0 = Luas Penampang (mm^2)

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

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

$$\sigma_{\text{yield}} = \frac{7842}{120}$$

$$\sigma_{\text{yield}} = 65,35 \text{ N/mm}^2$$

Dimana:

σ_{yield} = Regangan Luluh (N/mm^2)

P_{yield} = Tegangan Luluh (N)

A_0 = Luas Penampang (mm^2)

c. Maximum Stress (N/mm²)

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

$$\sigma_{max} = \frac{15808}{120}$$

$$\sigma_{max} = 131,73 \text{ N/mm}^2$$

Dimana:

$$\sigma_{max} = \text{Regangan Luluh (N/mm}^2\text{)}$$

$$P_{max} = \text{Tegangan Luluh (N)}$$

$$A_0 = \text{Luas Penampang (mm}^2\text{)}$$

d. Strain at Max Load (ε)

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

$$\varepsilon = \frac{3,676}{50} \times 100\%$$

$$\varepsilon = 7,352 \%$$

Dimana:

$$\varepsilon = \text{Regangan/strain saat load max (\%)}$$

$$L_0 = \text{Panjang awal benda (mm)}$$

$$\delta = \text{Displacement saat load max (mm)}$$

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, diperoleh nilai yield stress pada spesimen sebesar 65,35 N/mm² yang didapat dari pembagian antara beban luluh (Pyield) sebesar 7842 N terhadap luas penampang awal (A₀) sebesar 120 mm². Selanjutnya, nilai maximum stress yang mampu ditahan oleh spesimen diperoleh sebesar 131,73 N/mm², yang merupakan hasil pembagian antara beban maksimum (P_{max}) sebesar 15808 N terhadap luas penampang awal yang sama. Adapun nilai strain pada saat beban maksimum (strain at max load) diperoleh sebesar 7,352%, yang dihitung berdasarkan perbandingan antara displacement saat beban maksimum (δ) sebesar 3,676 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.

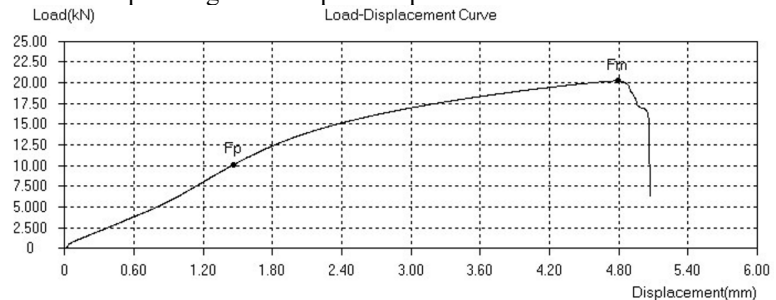
4.3.2 Perhitungan Uji Tarik Komposisi Kuningan 90% - Aluminium 10%



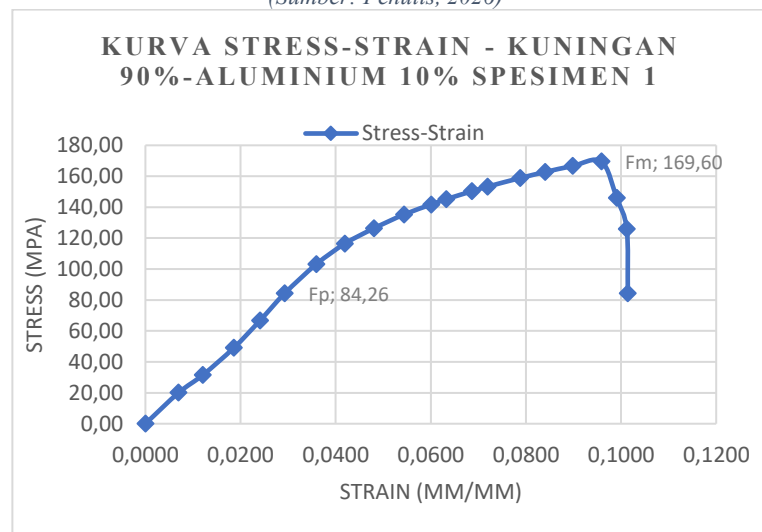
*Gambar 4. 10 Hasil Spesimen Uji Tarik Kuningan 90% - Aluminium 10%
(Sumber: Penulis, 2026)*

1. Perhitungan hasil pengujian tarik kuningan 90% - aluminium 10% spesimen 1

Setelah dilakukan pengujian tarik pada spesimen 1 didapatkan data hasil pengukuran yang disajikan dalam bentuk grafik hubungan penambahan beban terhadap perpanjangan spesimen atau load-displacement yang ditunjukkan pada Gambar 4.11. Dari kurva yang ditampilkan dapat dilihat bahwa spesimen mengalami kenaikan beban secara bertahap sesuai dengan bertambahnya deformasi yang terjadi pada material sampai dengan mencapai titik patah.



Gambar 4. 11 Kurva Load-Displacement Uji Tarik Kuningan 90% - Aluminium 10% Spesimen 1
(Sumber: Penulis, 2026)



Gambar 4. 12 Kurva Stress-Strain Uji Tarik Kuningan 90% - Aluminium 10% Spesimen 1
(Sumber: Penulis, 2026)

Setelah didapatkan grafik load-displacement dari hasil pengujian tarik, kemudian data diubah secara manual untuk membuat kurva stress-strain. Proses ini dilakukan dengan membagi kurva menjadi 21 titik pengamatan dan persamaan yang telah ditetapkan digunakan untuk menghitung nilai tegangan (stress) dan regangan (strain) pada setiap titik. Hasil perhitungan manual tersebut disajikan dalam bentuk kurva stress-strain yang ditunjukkan pada Gambar 4.12 Lalu data hasil perhitungan dirangkum secara lengkap pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 6 Stress-Strain Uji Tarik Kuningan 90% - Aluminium 10% Spesimen 1
(Sumber: Penulis, 2026)

No.	Strain ϵ (mm/mm)	Stress σ (MPa)
P0	0,0000	0,00
P1	0,0070	20,01
P2	0,0121	31,52
P3	0,0186	49,10
P4	0,0241	66,68
Pyield	0,0293	84,26
P6	0,0359	103,13
P7	0,0419	116,43
P8	0,0480	126,28
P9	0,0544	135,29
P10	0,0601	141,73
P11	0,0632	145,16
P12	0,0686	150,30
P13	0,0719	153,30
P14	0,0788	158,88
P15	0,0840	162,73
P16	0,0898	166,59
Pmax	0,0959	169,60
P18	0,0991	146,01
P19	0,1012	125,86
P20	0,1014	84,26

- a. Luas Penampang Spesimen (mm^2)

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

$$A_0 = 12 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$$

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

Dimana:

W = Lebar Spesimen (mm)

T = Tebal Spesimen (mm)

A_0 = Luas Penampang (mm^2)

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

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

$$\sigma_{\text{yield}} = \frac{10111}{120}$$

$$\sigma_{\text{yield}} = 84,26 \text{ N/mm}^2$$

Dimana:

σ_{yield} = Regangan Luluh (N/mm^2)

P_{yield} = Tegangan Luluh (N)

A_0 = Luas Penampang (mm^2)

c. Maximum Stress (N/mm²)

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

$$\sigma_{max} = \frac{20352}{120}$$

$$\sigma_{max} = 169,60 \text{ N/mm}^2$$

Dimana:

$$\sigma_{max} = \text{Regangan Luluh (N/mm}^2\text{)}$$

$$P_{max} = \text{Tegangan Luluh (N)}$$

$$A_0 = \text{Luas Penampang (mm}^2\text{)}$$

d. Strain at Max Load (ε)

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

$$\varepsilon = \frac{4,793}{50} \times 100\%$$

$$\varepsilon = 9,586 \%$$

Dimana:

$$\varepsilon = \text{Regangan/strain saat load max (\%)}$$

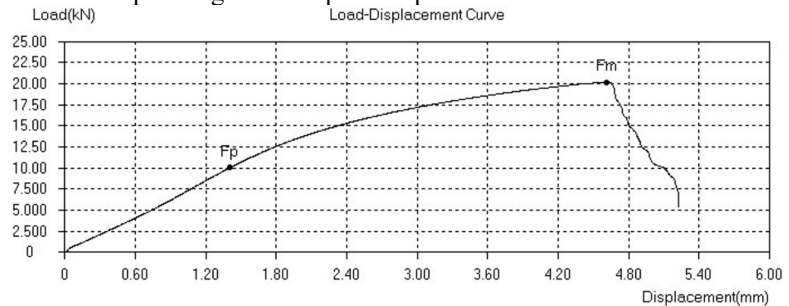
$$L_0 = \text{Panjang awal benda (mm)}$$

$$\delta = \text{Displacement saat load max (mm)}$$

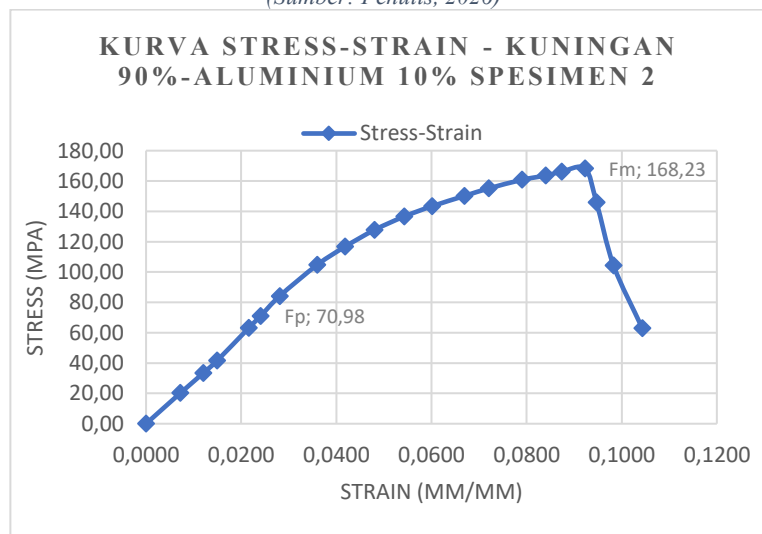
Berdasarkan hasil perhitungan di atas, diperoleh nilai yield stress pada spesimen sebesar 84,26 N/mm² yang didapat dari pembagian antara beban luluh (Pyield) sebesar 10111 N terhadap luas penampang awal (A₀) sebesar 120 mm². Selanjutnya, nilai maximum stress yang mampu ditahan oleh spesimen diperoleh sebesar 169,60 N/mm², yang merupakan hasil pembagian antara beban maksimum (P_{max}) sebesar 20352 N terhadap luas penampang awal yang sama. Adapun nilai strain pada saat beban maksimum (strain at max load) diperoleh sebesar 9,586%, yang dihitung berdasarkan perbandingan antara displacement saat beban maksimum (δ) sebesar 4,793 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 kuningan 90% - aluminium 10% spesimen 2

Setelah dilakukan pengujian tarik pada spesimen 2 didapatkan data hasil pengukuran yang disajikan dalam bentuk grafik hubungan penambahan beban terhadap perpanjangan spesimen atau load-displacement yang ditunjukkan pada Gambar 4.13. Dari kurva yang ditampilkan dapat dilihat bahwa spesimen mengalami kenaikan beban secara bertahap sesuai dengan bertambahnya deformasi yang terjadi pada material sampai dengan mencapai titik patah.



Gambar 4. 13 Kurva Load-Displacement Uji Tarik Kuningan 90% - Aluminium 10% Spesimen 2
(Sumber: Penulis, 2026)



Gambar 4. 14 Kurva Stress-Strain Uji Tarik Kuningan 90% - Aluminium 10% Spesimen 2
(Sumber: Penulis, 2026)

Setelah didapatkan grafik load-displacement dari hasil pengujian tarik, kemudian data diubah secara manual untuk membuat kurva stress-strain. Proses ini dilakukan dengan membagi kurva menjadi 21 titik pengamatan dan persamaan yang telah ditetapkan digunakan untuk menghitung nilai tegangan (stress) dan regangan (strain) pada setiap titik. Hasil perhitungan manual tersebut disajikan dalam bentuk kurva stress-strain yang ditunjukkan pada Gambar 4.14 Lalu data hasil perhitungan dirangkum secara lengkap pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 7 Stress-Strain Uji Tarik Kuningan 90% - Aluminium 10% Spesimen 2
(Sumber: Penulis, 2026)

No.	Strain ϵ (mm/mm)	Stress σ (MPa)
P0	0,0000	0,00
P1	0,0072	20,23
P2	0,0120	33,36
P3	0,0149	41,53
P4	0,0216	63,18
Pyield	0,0241	70,98
P6	0,0281	84,12
P7	0,0360	104,70
P8	0,0419	116,77
P9	0,0480	127,77
P10	0,0543	136,64
P11	0,0601	143,38
P12	0,0669	150,13
P13	0,0720	155,10
P14	0,0790	160,78
P15	0,0840	163,62
P16	0,0874	166,10
Pmax	0,0923	168,23
P18	0,0947	145,87
P19	0,0983	104,34
P20	0,1043	62,82

- a. Luas Penampang Spesimen (mm^2)

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

$$A_0 = 12 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$$

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

Dimana:

W = Lebar Spesimen (mm)

T = Tebal Spesimen (mm)

A_0 = Luas Penampang (mm^2)

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

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

$$\sigma_{\text{yield}} = \frac{8518}{120}$$

$$\sigma_{\text{yield}} = 70,98 \text{ N/mm}^2$$

Dimana:

σ_{yield} = Regangan Luluh (N/mm^2)

P_{yield} = Tegangan Luluh (N)

A_0 = Luas Penampang (mm^2)

c. Maximum Stress (N/mm²)

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

$$\sigma_{max} = \frac{20187}{120}$$

$$\sigma_{max} = 168,23 \text{ N/mm}^2$$

Dimana:

$$\sigma_{max} = \text{Regangan Luluh (N/mm}^2\text{)}$$

$$P_{max} = \text{Tegangan Luluh (N)}$$

$$A_0 = \text{Luas Penampang (mm}^2\text{)}$$

d. Strain at Max Load (ε)

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

$$\varepsilon = \frac{4,614}{50} \times 100\%$$

$$\varepsilon = 9,228 \%$$

Dimana:

$$\varepsilon = \text{Regangan/strain saat load max (\%)}$$

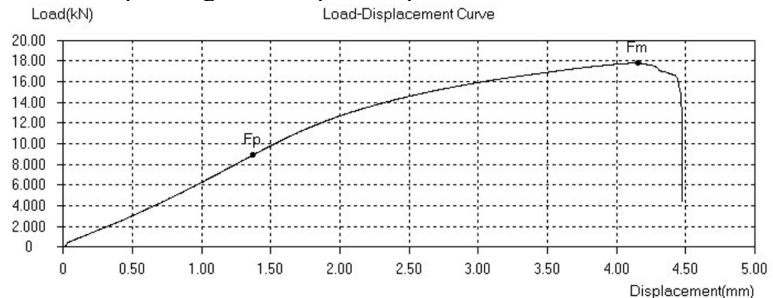
$$L_0 = \text{Panjang awal benda (mm)}$$

$$\delta = \text{Displacement saat load max (mm)}$$

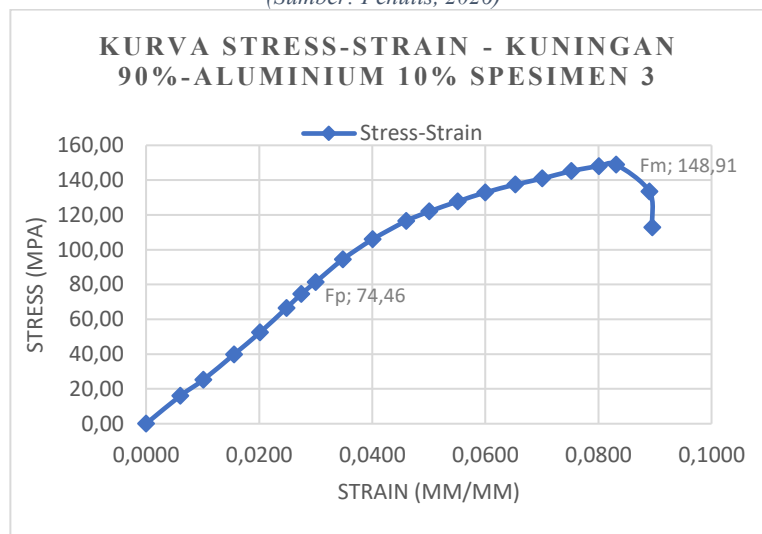
Berdasarkan hasil perhitungan di atas, diperoleh nilai yield stress pada spesimen sebesar 70,98 N/mm² yang didapat dari pembagian antara beban luluh (Pyield) sebesar 8518 N terhadap luas penampang awal (A₀) sebesar 120 mm². Selanjutnya, nilai maximum stress yang mampu ditahan oleh spesimen diperoleh sebesar 168,23 N/mm², yang merupakan hasil pembagian antara beban maksimum (P_{max}) sebesar 20187 N terhadap luas penampang awal yang sama. Adapun nilai strain pada saat beban maksimum (strain at max load) diperoleh sebesar 9,228%, yang dihitung berdasarkan perbandingan antara displacement saat beban maksimum (δ) sebesar 4,614 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.

3. Perhitungan hasil pengujian tarik kuningan 90% - aluminium 10% spesimen 3

Setelah dilakukan pengujian tarik pada spesimen 3 didapatkan data hasil pengukuran yang disajikan dalam bentuk grafik hubungan penambahan beban terhadap perpanjangan spesimen atau load-displacement yang ditunjukkan pada Gambar 4.15. Dari kurva yang ditampilkan dapat dilihat bahwa spesimen mengalami kenaikan beban secara bertahap sesuai dengan bertambahnya deformasi yang terjadi pada material sampai dengan mencapai titik patah.



Gambar 4. 15 Kurva Load-Displacement Uji Tarik Kuningan 90% - Aluminium 10% Spesimen 3
(Sumber: Penulis, 2026)



Gambar 4. 16 Kurva Stress-Strain Uji Tarik Kuningan 90% - Aluminium 10% Spesimen 3
(Sumber: Penulis, 2026)

Setelah didapatkan grafik load-displacement dari hasil pengujian tarik, kemudian data diubah secara manual untuk membuat kurva stress-strain. Proses ini dilakukan dengan membagi kurva menjadi 21 titik pengamatan dan persamaan yang telah ditetapkan digunakan untuk menghitung nilai tegangan (stress) dan regangan (strain) pada setiap titik. Hasil perhitungan manual tersebut disajikan dalam bentuk kurva stress-strain yang ditunjukkan pada Gambar 4.16 Lalu data hasil perhitungan dirangkum secara lengkap pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 8 Stress-Strain Uji Tarik Kuningan 90% - Aluminium 10% Spesimen 3
(Sumber: Penulis, 2026)

No.	Strain ϵ (mm/mm)	Stress σ (MPa)
P0	0,0000	0,00
P1	0,0061	16,03
P2	0,0101	25,20
P3	0,0155	39,81
P4	0,0201	52,41
P6	0,0248	66,44
Pyield	0,0274	74,46
P7	0,0300	81,33
P8	0,0348	94,50
P9	0,0401	105,96
P10	0,0460	116,55
P11	0,0501	121,99
P12	0,0551	127,72
P13	0,0600	132,88
P14	0,0653	137,46
P15	0,0700	140,89
P16	0,0752	145,19
P17	0,0801	148,05
Pmax	0,0831	148,91
P19	0,0890	133,45
P20	0,0895	112,83

- a. Luas Penampang Spesimen (mm^2)

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

$$A_0 = 12 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$$

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

Dimana:

W = Lebar Spesimen (mm)

T = Tebal Spesimen (mm)

A_0 = Luas Penampang (mm^2)

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

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

$$\sigma_{\text{yield}} = \frac{8935}{120}$$

$$\sigma_{\text{yield}} = 74,46 \text{ N/mm}^2$$

Dimana:

σ_{yield} = Regangan Luluh (N/mm^2)

P_{yield} = Tegangan Luluh (N)

A_0 = Luas Penampang (mm^2)

c. Maximum Stress (N/mm²)

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

$$\sigma_{max} = \frac{17,869}{120}$$

$$\sigma_{max} = 148,91 \text{ N/mm}^2$$

Dimana:

$$\sigma_{max} = \text{Regangan Luluh (N/mm}^2\text{)}$$

$$P_{max} = \text{Tegangan Luluh (N)}$$

$$A_0 = \text{Luas Penampang (mm}^2\text{)}$$

d. Strain at Max Load (ε)

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

$$\varepsilon = \frac{4,156}{50} \times 100\%$$

$$\varepsilon = 8,312 \%$$

Dimana:

$$\varepsilon = \text{Regangan/strain saat load max (\%)}$$

$$L_0 = \text{Panjang awal benda (mm)}$$

$$\delta = \text{Displacement saat load max (mm)}$$

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, diperoleh nilai yield stress pada spesimen sebesar 74,46 N/mm² yang didapat dari pembagian antara beban luluh (Pyield) sebesar 8935 N terhadap luas penampang awal (A₀) sebesar 120 mm². Selanjutnya, nilai maximum stress yang mampu ditahan oleh spesimen diperoleh sebesar 148,91 N/mm², yang merupakan hasil pembagian antara beban maksimum (P_{max}) sebesar 17869 N terhadap luas penampang awal yang sama. Adapun nilai strain pada saat beban maksimum (strain at max load) diperoleh sebesar 8,312%, yang dihitung berdasarkan perbandingan antara displacement saat beban maksimum (δ) sebesar 4,156 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.

4.3.3 Data Hasil Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui karakteristik mekanis material berdasarkan kemampuan material dalam menerima beban tarik hingga mengalami deformasi dan patah. Parameter yang diamati meliputi beban maksimum (*load max*), tegangan pada batas proporsional (*stress Fp*), tegangan maksimum (*stress Fm*), dan regangan maksimum (*strain max*).

1. Hasil Uji Tarik Komposisi Kuningan 100%

Tabel 4. 9 Hasil Uji Tarik Komposisi Kuningan 100%
(Sumber: Penulis, 2026)

Hasil Uji Tarik Kuningan 100%				
Spesimen	Load Max (kN)	Stress Fp (MPa)	Stress Fm (MPa)	Strain Max (%)
1	15,042	62,725	125,350	8,486
2	14,278	59,833	118,983	8,488
3	15,808	65,350	131,733	7,352
Rata-rata	15,043	62,636	125,355	8,109

Berdasarkan hasil pengujian tarik terhadap tiga spesimen pada komposisi kuningan 100% yang ditampilkan pada tabel 4.9, spesimen 3 mencatat nilai kekuatan tertinggi pada seluruh parameter kekuatan *load max* 15,808 kN, *stress Fp* 65,350 MPa, *stress Fm* 131,733 MPa), tetapi justru mencatat *strain max* terendah 7,352%. Sebaliknya, spesimen 2 mencatat kekuatan terendah pada seluruh parameter kekuatan (turun sekitar 5,09 dari rata-rata), tetapi *strain max* berada pada nilai tertinggi 8,488%. Spesimen 1 berada di posisi tengah untuk parameter kekuatan, namun nilai *strain max* hampir setara dengan spesimen 2.

Pola ini menunjukkan adanya hubungan berbanding terbalik antara kekuatan dan keuletan di antar ketiga spesimen dengan komposisi kuningan 100%, spesimen yang lebih kuat cenderung lebih getas, sedangkan spesimen yang lebih lema cenderung lebih ulet. Karena ketiga spesimen berasal dari komposisi kimia yang sama, variasi ini tidak dapat dijelaskan oleh perbedaan komposisi, melainkan lebih mungkin disebabkan oleh ketidakhomogenan lokal hasil pengecoran, seperti perbedaan tingkat porositas, ukuran butir atau distribusi cacat mikro antar spesimen.

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

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

Hasil Uji Tarik Kuningan 90% - Aluminium 10%				
Spesimen	Load Max (kN)	Stress Fp (MPa)	Stress Fm (MPa)	Strain Max (%)
1	20,352	84,258	169,600	9,586
2	20,187	70,983	168,225	9,228
3	17,869	74,458	148,908	8,312
Rata-rata	19,469	76,566	162,244	9,042

Berdasarkan hasil pengujian tarik terhadap tiga spesimen pada komposisi kuningan 90% - aluminium 10% yang ditampilkan pada tabel 4.10 menunjukkan tren yang konsisten atau searah pada ketiga spesimennya. Spesimen 1 mencatat nilai tertinggi pada hampir seluruh parameter (*load max*, *stress Fm*, dan *strain max* naik 4,53 – 6,02% di atas

rata-rata), spesimen 2 berada di posisi menengah dan spesimen 3 konsisten mencatat nilai terendah pada seluruh parameter (turun 8,08 – 8,22% dari rata-rata). Kekuatan dan keuletan pada komposisi ini naik-turun bersama-sama (tidak ada trade off seperti kuningan 100%), yang mengindikasikan bahwa variasi antar spesimen pada komposisi paduan ini lebih mungkin disebabkan oleh perbedaan tingkat homogenitas distribusi aluminium antar spesimen seperti spesimen 3 yang mengalami segregasi atau porositas lebih tinggi sehingga lemah pada seluruh parameter sekaligus, dibandingkan efek getas kuat seperti pada kuningan murni.

3. Hasil Rata-rata Uji Tarik

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

Komposisi	Load Max (kN)	Stress Fp (MPa)	Stress Fm (MPa)	Strain Max (%)
Kuningan 100%	15,043	62,636	125,355	8,109
Kuningan 90% - Aluminium 10%	19,469	76,566	162,244	9,042

Perbandingan hasil rata-rata pengujian tarik antara komposisi kuningan 100% dan komposisi kuningan 90%–aluminium 10% menunjukkan adanya peningkatan pada seluruh parameter pengujian setelah dilakukan penambahan aluminium sebesar 10%. Nilai *load max* mengalami peningkatan sebesar 29,42%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa komposisi kuningan 90% - aluminium 10% mampu menerima beban tarik yang lebih besar sebelum mengalami kegagalan dibandingkan komposisi kuningan 100%.

Pada parameter stress Fp, terjadi peningkatan sekitar 22,24%, hal ini menunjukkan bahwa material dengan penambahan aluminium memiliki batas elastis yang lebih tinggi sehingga mampu menerima tegangan lebih besar sebelum memasuki daerah deformasi plastis. Perbedaan yang cukup signifikan juga terlihat pada stress fm, yaitu meningkat sekitar 29,34%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa penambahan aluminium memberikan peningkatan kemampuan material dalam menahan tegangan maksimum sebelum mengalami patah. Peningkatan kekuatan tarik ini diduga disebabkan oleh terbentuknya struktur mikro yang lebih rapat sehingga mampu menghambat pergerakan dislokasi selama pembebanan tarik.

Selain itu, penambahan aluminium juga meningkatkan nilai *strain max* dari 8,109% menjadi 9,042%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa material masih memiliki kemampuan mengalami deformasi plastis yang cukup baik meskipun kekuatan tariknya meningkat. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa penambahan aluminium sebesar 10% mampu menghasilkan keseimbangan antara kekuatan (*strength*) dan keuletan (*ductility*), sehingga material menjadi lebih tangguh dibandingkan kuningan 100%.

4.3.4 Evaluasi Hasil Uji Tarik

4.3.4.1 Perhitungan Safety Factor (Faktor Keamanan)

Evaluasi terhadap hasil uji tarik dilakukan dengan menghitung nilai faktor keamanan untuk mengetahui tingkat keamanan material terhadap beban tarik yang diterima. Faktor keamanan diperoleh dengan membandingkan nilai kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*) rata-rata hasil pengujian dengan nilai kekuatan minimum yang diperoleh dari hasil perhitungan, dengan persamaan sebagai berikut:

$$Safety\ of\ Factor = \frac{\sigma_{rata - rata}}{\sigma_{minimum}}$$

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

- a. Komposisi Kuningan 100%

$$SF = \frac{125,355\ MPa}{19,10\ MPa}$$
$$SF = 6,5$$

- b. Komposisi Kuningan 90% - Aluminium 10%

$$SF = \frac{162,244\ MPa}{19,10\ MPa}$$
$$SF = 8,5$$

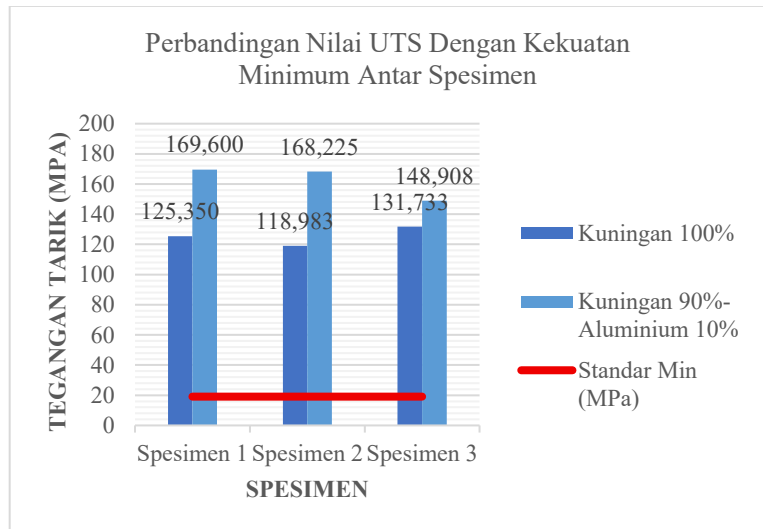
Tabel 4. 12 Hasil Nilai Safety Factor
(Sumber: Penulis, 2026)

Komposisi	Stress Fm (MPa)	Stress Min (MPa)	Safety Factor
Kuningan 100%	125,355	19,10	6,5
Kuningan 90% - Aluminium 10%	162,244	19,10	8,5

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh hasil masing-masing komposisi yang terdapat pada tabel 4.11. Perbedaan nilai tersebut menunjukkan bahwa penambahan unsur aluminium 10% memengaruhi karakteristik kekakuan tarik material, sehingga menghasilkan *safety factor* yang lebih tinggi dibandingkan kuningan 100% terhadap beban tarik minimum sesuai dengan hasil perhitungan. Berdasarkan pertimbangan aspek keamanan terhadap beban tarik, komposisi kuningan 90% - aluminium 10% dapat direkomendasikan sebagai alternatif material yang optimal.

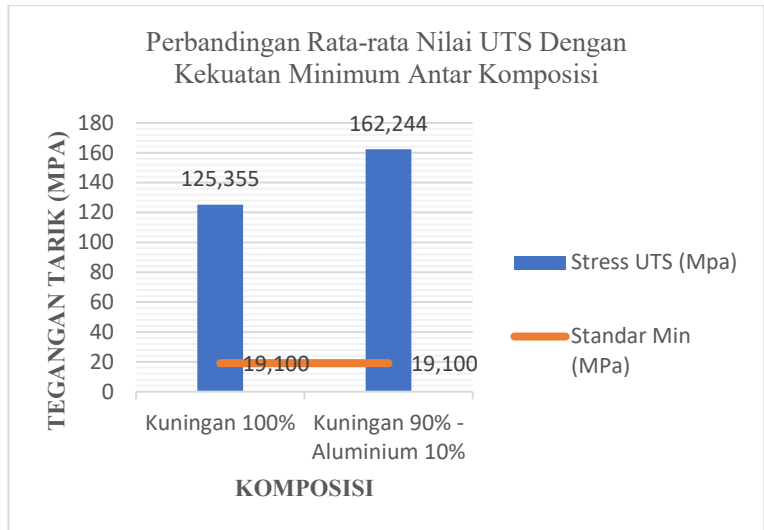
Meskipun demikian terdapat variasi nilai kekuatan tarik maksimum antar spesimen pada masing-masing komposisi yang perlu diperhatikan. Pada komposisi kuningan 100% maupun kuningan 90% - aluminium 10% masih berada dalam rentang yang lazim dan dianggap wajar pada setiap nilai *stress Fm*. Namun pada komposisi paduan kuningan 90% - aluminium 10% pada spesimen 3 menurun sekitar 20 MPa dibandingkan dengan spesimen 1 dan 2, yang

mengindikasikan kemungkinan ketidakhomogenan distribusi aluminium selama proses pengecoran sebagaimana telah disinggung pada bagian BAB IV awal dengan kemungkinan disebabkan oleh perbedaan lokal tingkat porositas atau distribusi unsur paduan yang tidak seragam, meskipun berasal dari proses peleburan dan penunagan yang sama.



Gambar 4. 17 Grafik Perbandingan Nilai UTS dengan Kekuatan Minimum Spesimen Uji Tarik
(Sumber: Penulis, 2026)

Berdasarkan gambar 4.17, nilai *ultimate tensile strength* pada tiap spesimen mengalami kenaikan pada komposisi kuningan 90% - aluminium 10% dan nilai memenuhi standar minimum sesuai dengan perhitungan. Perbandingan tersebut menunjukkan bahwa setiap spesimen memiliki nilai *ultimate tensile strength* yang lebih tinggi sehingga mengindikasikan adanya peningkatan kemampuan material dalam menahan beban tarik.



Gambar 4. 18 Grafik Perbandingan Rata-rata Nilai UTS Dengan Kekuatan Minimum Antar Komposisi Uji Tarik
(Sumber: Penulis, 2026)

Berdasarkan Gambar 4.18, menampilkan perbandingan nilai rata-rata *ultimate tensile strength* (UTS) uji tarik antar komposisi terhadap standar kekuatan minimum dimana komposisi kuningan 100% menghasilkan nilai sebesar 125,355 MPa dan komposisi kuningan 90% - aluminium 10% menghasilkan nilai sebesar 162,244 MPa. Kedua nilai tersebut berada jauh di atas standar minimum sebesar 19,1 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan unsur aluminium 19% memberikan pengaruh positif terhadap peningkatan kekuatan tarik material dibandingkan dengan kuningan 100%.

Pada penelitian (Alam et al., 2022) menguji material kuningan dan paduan penambahan aluminium didapatkan hasil uji tarik sebesar +300 MPa. Selain itu pada penelitian (Akhyar, 2023) menunjukkan material kuningan cor memiliki kekuatan tarik maksimum 352 MPa dan terakhir pada penelitian (Nugroho & Wiboqo, 2017) didapatkan hasil rata-rata material kuningan maupun paduan kuningan aluminium sebesar +350 N/mm². Perbedaan nilai yang jauh tersebut kemungkinan besar disebabkan oleh kondisi proses pengecoran yang belum dikontrol atau berbeda maupun jenis material pada penelitian terdahulu. Beberapa faktor yang diduga penyebab dari perbedaan nilai tersebut yaitu:

1. Sumber bahan baku material, beberapa penelitian terdahulu material yang digunakan berupa material yang bersertifikat atau material yang sudah diketahui komposisi kimianya sedangkan material penelitian ini merupakan material bekas/skrup hasil daur ulang yang dilakukan peleburan ulang sehingga komposisi materialnya memiliki kandungan pengotor atau terkontaminasi unsur lainnya dan porisitas gas terlarut.
2. Metode dan parameter proses pengecoran, ketiga penelitian perbandingan menggunakan cetakan permanen atau die casting dengan kontrol suhu tuang yang presisi. Jika proses pengecoran

menggunakan *sand casting* sesuai dengan penelitian tanpa kontrol suhu tuang, maka porositas dan struktur butir kasar yang dihasilkan berpotensi jauh lebih signifikan menurunkan nilai UTS.

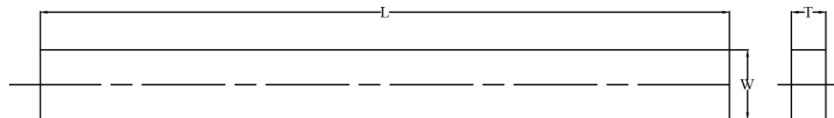
3. Porositas hasil pengecoran relatif tinggi akibat gas terperangkap selama proses penuangan pada cetakan pasir yang mengurangi luas penampang efektif spesimen dalam menahan beban tarik.
4. Tidak dilakukannya proses perlakuan panas (*heat treatment*) pasca pengecoran yang terdapat pada penelitian terdahulu terbukti dapat meningkatkan kekuatan tarik secara signifikan
5. Perbedaan komposisi kimia aktual dikarenakan belum adanya verifikasi dari uji komposisi kimia, sehingga kemungkinan komposisi material yang tercampur atau paduan unsur hasil pengecoran dapat memengaruhi hasil.

Sebagai catatan, penelitian ini tidak melakukan pengujian metalografi maupun uji komposisi kimia untuk memverifikasi penyebab pasti dari kesenjangan nilai tersebut, sehingga faktor-faktor di atas bersifat dugaan berdasarkan kondisi proses fabrikasi pada BAB III, bukan hasil pembuktian secara 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 maksimum, regangan lentur maksimum dan defleksi maksimum material propeller kapal nelayan hasil pengecoran. Pengujian ini dilakukan berdasarkan standar ASTM E290. Berbeda dengan pengujian tarik pada sub-bab 4.3, hasil pengujian bending pada penelitian ini tidak divalidasi terhadap 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, 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, 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-8 seperti pada Gambar 4.19.



Gambar 4. 19 Bentuk dan Ukuran Spesimen Uji Bending
(Sumber: Penulis, 2026)

Keterangan:

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

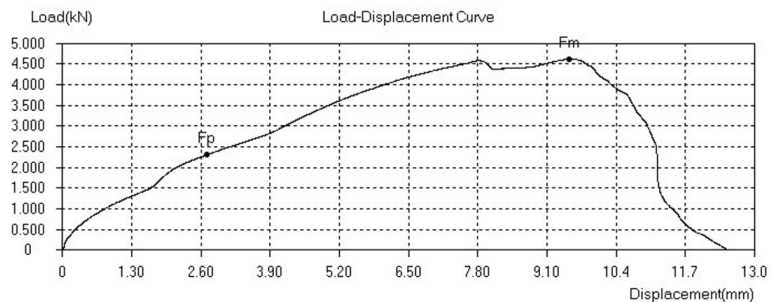
4.4.1 Perhitungan Uji Bending Komposisi Kuningan 100%



Gambar 4. 20 Hasil Spesimen Uji Bending Kuningan 100%
(Sumber: Penulis, 2026)

1. Perhitungan hasil pengujian bending kuningan 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 4.21.



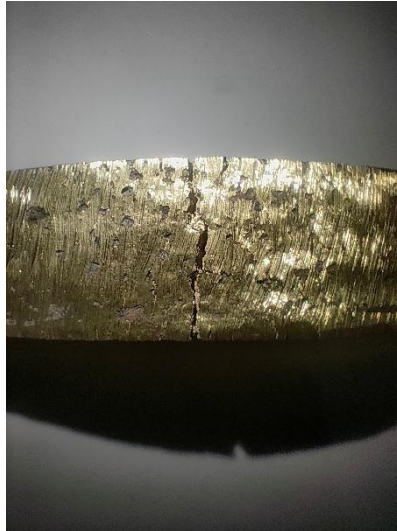
Gambar 4. 21 Kurva Load-Displacement Uji Bending Kuningan 100% Spesimen 1

(Sumber: Penulis, 2026)

Berdasarkan pembacaan grafik, kurva menunjukkan beberapa fase yang berbeda. Pada tahap awal pembebanan (0–2,60 mm), beban meningkat secara relatif linier hingga mencapai titik Fp pada beban sekitar 2,20–2,30 kN, yang mengindikasikan fase penyesuaian kontak awal antara permukaan spesimen dengan plunger dan tumpuan sekaligus awal terjadinya deformasi plastis. Selanjutnya, beban terus meningkat dengan kemiringan yang melandai (mengindikasikan deformasi plastis berlanjut) hingga mencapai titik puncak lokal pada displacement sekitar 7,80 mm beban 4,50 kN. Setelah titik ini, beban sedikit berfluktuasi sebelum akhirnya naik kembali dan mencapai beban maksimum (Fm) sebesar 4,60 kN pada displacement sekitar 9,50 mm.

Setelah beban maksimum tercapai, kurva menunjukkan penurunan yang bertahap dan bertingkat bukan penurunan tajam mendadak. Sebelum mengalami penurunan yang lebih tajam antara displacement 10,40–11,70 mm, kemudian terus melandai turun mendekati nol pada displacement sekitar 12,0 mm. Pola penurunan multi-fase ini mengindikasikan bahwa spesimen 1 mengalami mekanisme kegagalan yang cenderung ulet (*ductile-type failure*), dengan retak yang kemungkinan merambat secara progresif disertai deformasi plastis lanjutan pada permukaan tarik, alih-alih patah secara mendadak.

Pengujian dihentikan pada sudut lentur 32° 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 Visualisasi keretakan spesimen 1 kuningan 100%

Sumber: (Penulis, 2026)

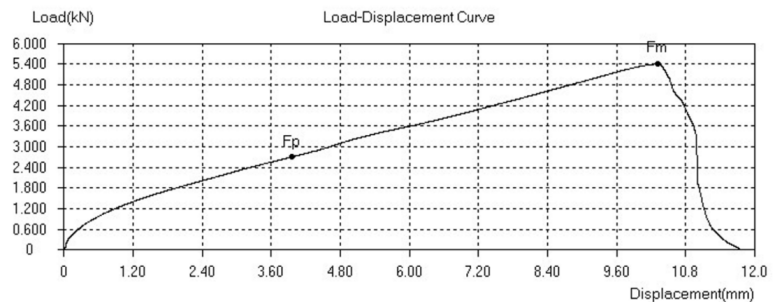
Pemeriksaan visual pada Gambar 4.22 menunjukkan retak utama melintang pada arah sumbu spesimen, terletak di area yang mengalami tegangan tarik maksimum. Retak tampak menembus cukup dalam ke permukaan namun tidak melebar, dan tersebar di sekitar sejumlah lubang-lubang kecil dengan indikasi porositas hasil pengecoran.

Pengujian dihentikan pada sudut lentur 32° saat teramati retak pertama pada permukaan cembung spesimen, ditandai dengan kurva *load-displacement* yang menunjukkan penurunan bertahap dan bertingkat segera setelah beban puncak (F_m), sesuai pendekatan penentuan sudut yang umum digunakan dalam karakterisasi keuletan paduan logam berdasarkan titik muncul retak pertama (ASTM E290 – *Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility*, 2022).

Kapasitas beban yang tinggi di sekitar 4,60 kN sebelum kegagalan mengindikasikan secara struktural spesimen mampu menahan gaya lentur yang relatif besar. Pola penurunan kurva yang bertahap mengindikasikan bahwa spesimen memiliki tingkat keuletan lentur yang lebih baik, retak yang terbentuk merambat secara progresif disertai deformasi plastis lanjutan, bukan mekanisme kegagalan getas mendadak.

2. Perhitungan hasil pengujian bending kuningan 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 4.23.



Gambar 4. 23 Kurva Load-Displacement Uji Bending Kuningan 100% Spesimen 2
(Sumber: Penulis, 2026)

Berdasarkan pembacaan grafik, kurva menunjukkan tiga fase yang cukup jelas terbedakan. Pada tahap awal pembebanan (0-3,90 mm), beban meningkat secara linier hingga mencapai titik Fp pada beban sekitar 2,70 kN, mengindikasikan fase penyesuaian kontak awal antara permukaan spesimen dengan plunger dan tumpuan sekaligus awal terjadinya deformasi plastis. Fase kedua berlangsung dari titik tersebut hingga beban maksimum (Fm) sebesar 5,40 kN pada displacement sekitar 10,3 mm, dengan kemiringan kurva yang relatif konsisten dan sedikit melandai menjelang beban puncak, mengindikasikan proses *strain hardening* yang berlangsung cukup panjang sebelum material mengalami kejenuhan deformasi plastis.

Segera setelah beban puncak tercapai, kurva menunjukkan penurunan yang tajam dan curam dari displacement 10,3 mm hingga mendekati nol pada displacement sekitar 11,50 mm. pola penurunan dalam satu tahap tunggal ini berbeda dari Spesimen 1 yang menunjukkan penurunan bertahap dan bertingkat (multi-fase) setelah Fm. Pola ini mengindikasikan bahwa kegagalan pada Spesimen 2 berlangsung lebih cepat dan mendekati karakteristik brittle-like failure dibandingkan Spesimen 1, meskipun kapasitas beban maksimumnya 5,40 kN justru lebih tinggi dibandingkan Spesimen 1 4,60 kN.

Pengujian dihentikan pada sudut lentur 35° setelah teramati retak pertama pada permukaan cembung spesimen, sesuai prosedur ASTM E290.



Gambar 4. 24 Visualisasi keretakan spesimen 2 kuningan 100%

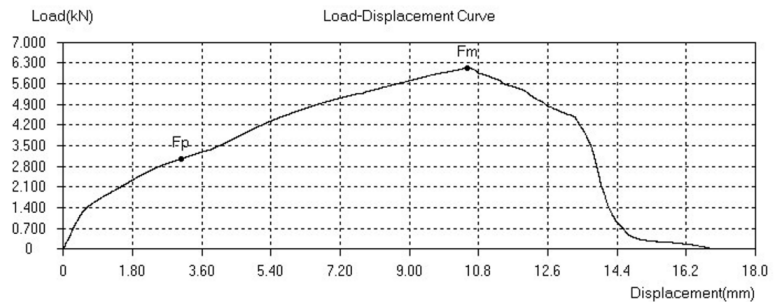
Sumber: (Penulis, 2026)

Pemeriksaan visual pada Gambar 4.24 menunjukkan satu retak utama melintang pada permukaan cembung spesimen, tepat di bawah titik kontak plunger sama seperti spesimen 1. Namun, dibandingkan dengan Spesimen 1, retak pada Spesimen 2 tampak lebih lebar dan lebih terbuka, dengan celah (gap) yang secara visual sudah tampak terbuka di bagian tepi bawah spesimen, mengindikasikan tingkat perambatan retak yang lebih lanjut meskipun belum terjadi pemisahan total (*complete fracture*).

Retak yang lebih terbuka pada Spesimen 2 ini konsisten dengan pola kurva beban-displacement yang menunjukkan penurunan tajam dan mendadak setelah beban puncak, retak yang terbentuk cenderung merambat dengan cepat begitu inisiasi retak terjadi, alih-alih merambat secara bertahap seperti pada Spesimen 1. Kombinasi antara kapasitas beban maksimum yang lebih tinggi, namun mekanisme kegagalan yang lebih mendadak, mengindikasikan bahwa Spesimen 2 memiliki kekuatan lentur yang lebih besar tetapi tingkat keuletan (*ductility*) yang relatif lebih rendah dibandingkan Spesimen 1.

3. Perhitungan hasil pengujian bending kuningan 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 4.25.



Gambar 4. 25 Kurva Load-Displacement Uji Bending Kuningan 100% Spesimen 3
(Sumber: Penulis, 2026)

Berdasarkan pembacaan grafik, kurva menunjukkan tiga fase yang cukup jelas terbedakan. Pada tahap awal pembebanan (0-3,00 mm), beban meningkat secara relatif cepat hingga mencapai titik Fp pada beban sekitar 3,00–3,10 kN, mengindikasikan fase penyesuaian kontak awal sekaligus awal terjadinya deformasi plastis. Fase kedua berlangsung dari titik tersebut hingga beban maksimum (Fm) sebesar 6,10–6,20 kN pada displacement sekitar 10,50 mm, nilai beban maksimum ini merupakan yang tertinggi di antara ketiga spesimen Kuningan 100% (Spesimen 1: 4,60 kN, Spesimen 2: 5,40 kN; Spesimen 3: 6,10–6,20 kN), dengan kemiringan kurva yang relatif konsisten sepanjang fase deformasi plastis, menunjukkan kapasitas *strain hardening* yang paling besar di antara ketiganya.

Segara setelah beban puncak tercapai, kurva menunjukkan penurunan tajam dari displacement 10,50 mm hingga sekitar 14,40 mm, kemudian melandai turun secara bertahap hingga mendekati nol pada displacement sekitar 16,80 mm. Pola penurunan ini berada di antara karakteristik Spesimen 1 (penurunan bertahap-bertingkat) dan Spesimen 2 (penurunan tajam dalam satu tahap) menunjukkan penurunan awal yang cukup tajam namun tetap disertai fase pelandaian sebelum benar-benar kehilangan kapasitas beban, mengindikasikan tingkat keuletan sisa yang masih cukup baik meskipun kekuatannya paling tinggi.

Pengujian dihentikan pada sudut lentur 37° setelah teramati retak pertama pada permukaan cembung spesimen, sesuai prosedur ASTM E290.



*Gambar 4. 26 Visualisasi keretakan spesimen 3 kuningan 100%
Sumber: (Penulis, 2026)*

Pemeriksaan visual pada Gambar 4.26 menunjukkan satu retak utama melintang pada permukaan cembung spesimen, tepat di bawah kontak plunger konsisten dengan pola retak pada spesimen 1 dan 2. Karakteristik retak pada spesimen 3 berupa retak tampak sebagai celah tunggal yang cukup rapat dan belum terbuka lebar. Retak yang relatif rapat ini konsisten dengan pola kurva beban-displacement Spesimen 3 yang menunjukkan fase pelandaian setelah penurunan awal, mengindikasikan bahwa meskipun retak sudah terinisiasi, perambatannya tidak secepat Spesimen 2, sehingga material masih mampu menahan sejumlah deformasi plastis tambahan sebelum kapasitas bebannya benar-benar hilang.

Secara keseluruhan, ketiga spesimen komposisi kuningan 100% menunjukkan pola kegagalan retak pertama pada rentang sudut lentur 32° - 37° , mengindikasikan tingkat keuletan lentur yang bervariasi antar spesimen meskipun berasal dari komposisi yang identik. Terdapat korelasi yang konsisten antara kapasitas beban maksimum dan sudut lentur yang dicapai: spesimen dengan beban maksimum tertinggi spesimen 3 yaitu 6,10-6,20 kN juga mencapai sudut lentur terbesar, sedangkan spesimen beban maksimum terendah spesimen 1 yaitu 4,60 kN gagal pada sudut terkecil.

Meskipun demikian, pola korelasi ini tidak sepenuhnya mencerminkan tingkat keuletan pasca-inisiasi retak. Spesimen 1 walau gagal pada sudut lentur terkecil justru menunjukkan mekanisme perambatan retak yang paling bertahap ditandai penurunan kurva beban-displacement yang bertingkat, bukan mendadak dan karakter retak visual yang rapat atau belum terbuka lebar. Sebaliknya, Spesimen 2 mencapai sudut lentur menengah, namun menunjukkan perambatan retak yang paling cepat dan mendadak setelah inisiasi penurunan kurva tajam dalam satu tahap, disertai retak visual yang paling terbuka di antara ketiga spesimen. Spesimen 3 menunjukkan karakteristik gabungan sudut lentur terbesar dengan pola perambatan retak yang

lebih rapat di antara kedua spesimen lainnya. Perbedaan antara urutan sudut lentur saat inisiasi retak dan urutan keuletan pasca-inisiasi ini mengindikasikan bahwa variasi tingkat keuletan lentur pada komposisi yang identik lebih berkaitan dengan variasi kualitas lokal hasil pengecoran. Perbandingan menyeluruh antar-spesimen 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 Kuningan 90% - Aluminium 10%

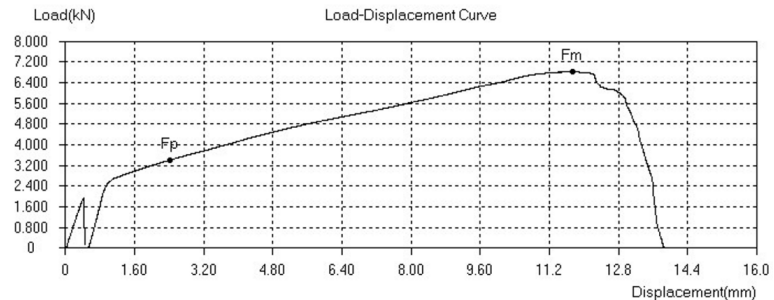
Pengujian bending pada komposisi Kuningan 90% - Aluminium 10% dilakukan dengan konfigurasi dan prosedur yang sama seperti komposisi Kuningan 100%, yaitu Guided-bend, U-bend Test sesuai ASTM E290 dengan jarak antar tumpuan 130 mm.



*Gambar 4. 27 Hasil Spesimen Uji Bending Kuningan 90% - Aluminium 10%
(Sumber: Penulis, 2026)*

1. Perhitungan hasil pengujian bending kuningan 90% - aluminium 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 4.28.



Gambar 4. 28 Kurva Load-Displacement Uji Bending Kuningan 90% - Aluminium 10% Spesimen 1
(Sumber: Penulis, 2026)

Berdasarkan pembacaan grafik, kurva menunjukkan pola pembebanan awal yang sedikit berbeda dari spesimen-spesimen kuningan 100% sebelumnya: pada rentang displacement 0–0,50 mm, terjadi fluktuasi/osilasi kecil pada beban (naik-turun tipis sebelum naik stabil), yang mengindikasikan fase penyesuaian kontak awal antara permukaan spesimen dengan plunger dan tumpuan yang belum sepenuhnya rata. Setelah fase ini, beban meningkat secara relatif linier hingga mencapai titik F_p pada beban sekitar 3,40 kN pada displacement 2,40 mm, menandai awal terjadinya deformasi plastis. Fase kedua berlangsung dari titik F_p hingga beban maksimum (F_m) sebesar 6,80 kN pada displacement sekitar 11,70 mm, nilai beban maksimum ini jauh lebih tinggi dibandingkan seluruh spesimen kuningan 100% (rentang 4,70–6,40 kN). Kemiringan kurva pada fase ini relatif konsisten dan sedikit melandai menjelang puncak, menunjukkan proses *strain hardening* yang berlangsung panjang. Segera setelah beban puncak tercapai, kurva menunjukkan penurunan yang sangat tajam dan curam dari displacement 12,80 mm hingga mendekati nol pada displacement sekitar 13,60 mm, pola penurunan dalam satu tahap tunggal tanpa fase pelandaian ini mengindikasikan mekanisme kegagalan yang cenderung mendekati *brittle-like failure* begitu retak signifikan terinisiasi.

Pengujian dihentikan pada sudut lentur 45° setelah teramati retak pertama pada permukaan cembung spesimen, sesuai prosedur ASTM E290.

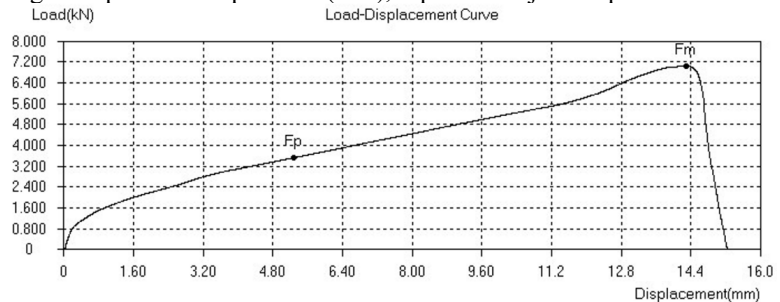


Gambar 4. 29 Visualisasi keretakan spesimen 1 kuningan 90% - aluminium 10%
Sumber: (Penulis, 2026)

Pemeriksaan visual pada Gambar 4.29 menunjukkan retak pada arah melintang sumbu spesimen, terletak di area permukaan cembung, tepat di bawah titik kontak plunger. Retak tampak menembus cukup dalam ke permukaan dengan jalur membelok dan bercabang mengikuti arah melintang, berbeda dari retak tunggal yang rapi seperti pada spesimen kuningan 100%. Pola retak bertingkat ini mengindikasikan bahwa jalur perambatan retak mengalami pembelokan (*deflection*) saat menjalar melalui material, kemungkinan akibat interaksi dengan batas butir atau fase kedua yang terbentuk akibat penambahan aluminium. Pengujian dihentikan pada sudut lentur 45° saat teramati retak pertama pada permukaan cembung spesimen, ditandai dengan kurva *load-displacement*. Kapasitas beban yang tinggi di sekitar 6,80 kN sebelum kegagalan mengindikasikan secara struktural spesimen mampu menahan gaya lentur yang jauh lebih besar.

2. Perhitungan hasil pengujian bending kuningan 90% - aluminium 10% spesimen 2

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



Gambar 4. 30 Kurva Load-Displacement Uji Bending Kuningan 90% - Aluminium 10% Spesimen 2
(Sumber: Penulis, 2026)

Berdasarkan pembacaan grafik, kurva menunjukkan peningkatan beban yang relatif linier sejak awal pembebanan hingga mencapai titik Fp pada beban sekitar 3,50 kN pada displacement 5,20 mm, menandai awal terjadinya deformasi plastis. Fase kedua berlangsung dari titik Fp hingga beban maksimum (Fm) sebesar 7,00 kN pada displacement sekitar 14,30 mm, nilai beban maksimum ini merupakan yang tertinggi di antara seluruh spesimen yang telah dianalisis sejauh ini. Kemiringan kurva pada fase ini tetap relatif konsisten hingga mendekati puncak, dengan sedikit pelandaian menjelang Fm yang mengindikasikan proses strain hardening berlangsung hampir sepanjang rentang deformasi.

Segera setelah beban puncak tercapai, kurva menunjukkan penurunan yang sangat tajam dan curam dari displacement 14,30 mm hingga mendekati nol pada displacement sekitar 15,60 mm, pola penurunan mendadak dalam satu tahap tunggal ini konsisten dengan pola Spesimen 1 komposisi paduan yang sama, mempertegas kecenderungan komposisi Kuningan 90%–Aluminium 10% mengalami kegagalan yang mendekati mekanisme getas (*brittle-like*) begitu retak signifikan terinisiasi, meskipun kapasitas beban yang ditahan sebelumnya sangat tinggi.

Pengujian dihentikan pada sudut lentur 52° setelah teramati retak pertama pada permukaan cembung spesimen, sesuai prosedur ASTM E290.



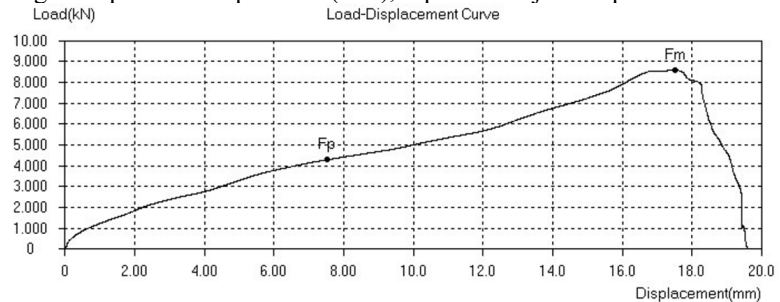
Gambar 4. 31 Visualisasi keretakan spesimen 2 kuningan 90% - aluminium 10%
Sumber: (Penulis, 2026)

Pemeriksaan visual pada Gambar 4.31 menunjukkan retak pada permukaan cembung spesimen dengan karakter yang berbeda, retak pada spesimen 2 tampak sebagai satu bukaan yang lebih lokal namun lebih dalam, dengan sebagian material di tepi retak tampak mulai terlepas sebagian dan permukaan patahan yang kasar dan tidak beraturan di sekitar titik bukaan tersebut. Tidak ditemukan indikasi pemisahan total (complete fracture), namun bukaan retak ini secara visual tampak lebih signifikan dibandingkan retak pada Spesimen 1.

Kapasitas beban yang sangat tinggi 7,00 kN yang dicapai sebelum kegagalan mengindikasikan secara struktural spesimen ini paling mampu menahan gaya lentur di antara seluruh spesimen yang diuji. Namun, sudut lentur 52° yang tercapai sebelum retak, jauh lebih besar dibandingkan estimasi sudut pada spesimen-spesimen Kuningan 100% sebelumnya, dikombinasikan dengan pola penurunan kurva yang tetap tajam-mendadak, menunjukkan bahwa penambahan aluminium tidak hanya meningkatkan kekuatan lentur, tetapi juga memperbesar kapasitas sudut lentur yang dapat ditahan sebelum inisiasi retak.

3. Perhitungan hasil pengujian bending kuningan 90% - aluminium 10% spesimen 3

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



Gambar 4. 32 Kurva Load-Displacement Uji Bending Kuningan 90% - Aluminium 10% Spesimen 3
(Sumber: Penulis, 2026)

Berdasarkan pembacaan grafik, kurva menunjukkan peningkatan beban yang relatif linier sejak awal pembebanan hingga mencapai titik F_p pada beban sekitar 4,30 kN pada displacement 7,50 mm, menandai awal terjadinya deformasi plastis. Fase kedua berlangsung dari titik F_p hingga beban maksimum (F_m) sebesar 8,60 kN pada displacement sekitar 17,50 mm, nilai beban maksimum ini merupakan yang tertinggi di antara seluruh spesimen yang telah dianalisis pada kedua komposisi (lebih tinggi dari Spesimen 1 dan 2 komposisi paduan yang sama). Kemiringan kurva pada fase ini tetap konsisten hampir di sepanjang rentang deformasi hingga mendekati puncak, mengindikasikan kapasitas *strain hardening* paling besar di antara seluruh spesimen yang diuji.

Segera setelah beban puncak tercapai, kurva menunjukkan penurunan bertahap dari displacement 17,50 mm hingga sekitar 18,20 mm (beban masih relatif tertahan di kisaran 8,00 kN, sebelum mengalami penurunan yang lebih tajam antara displacement 18,20–19,60 mm hingga mendekati nol. Pola penurunan bertahap-lalu-tajam ini berbeda dari Spesimen 1 dan 2 komposisi yang sama, menunjukkan bahwa Spesimen 3 memiliki tingkat keuletan pasca-inisiasi retak yang relatif lebih baik dibandingkan dua spesimen lainnya dalam komposisi paduan yang sama, meskipun kapasitas beban maksimumnya justru yang paling tinggi.

Pengujian dihentikan pada sudut lentur 54° saat teramati retak pertama pada permukaan cembung spesimen, sesuai prosedur ASTM E290.



Gambar 4. 33 Visualisasi keretakan spesimen 3 kuningan 90% - aluminium 10%
Sumber: (Penulis, 2026)

Pemeriksaan visual pada Gambar 4.32 menunjukkan retak yang berlokasi ke arah tepi permukaan cembung spesimen, berbeda dari pola retak spesimen sebelumnya. Retak tampak menjalar secara melintang di dekat tepi spesimen. Celah retak tampak belum terbuka lebar, dengan permukaan patahan yang relatif kasar di sekitar titik bukaan, tidak ditemukan indikasi pemisahan total (*complete fracture*) pada spesimen ini.

Pola retak diagonal-bertingkat di dekat tepi ini tetap konsisten dengan pola kurva *load-displacement* Spesimen 3 yang menunjukkan fase pelandaian (bukan penurunan tajam mendadak langsung) setelah beban puncak, retak yang terinisiasi di lokasi yang sedikit off-center kemungkinan merambat lebih lambat karena tidak langsung berada di jalur tegangan maksimum penuh, sehingga material masih mampu menahan sejumlah deformasi tambahan sebelum kapasitas bebannya benar-benar menurun signifikan.

Secara keseluruhan, ketiga spesimen komposisi Kuningan 90%-aluminium 10% menunjukkan pola kegagalan retak pertama pada rentang sudut lentur 45° – 52° – 54° , dengan kapasitas beban maksimum yang jauh lebih tinggi dibandingkan komposisi kuningan 100% pada seluruh spesimennya. Terdapat korelasi yang konsisten antara kapasitas beban dan sudut lentur yang dicapai, spesimen dengan beban maksimum tertinggi (Spesimen 3, 8,60 kN) diduga juga mencapai sudut lentur terbesar sebelum retak pertama muncul, sedangkan spesimen dengan beban maksimum terendah (Spesimen 1, 6,80 kN) diduga gagal pada sudut terkecil.

Perbedaan antara urutan sudut lentur saat inisiasi retak dan urutan keuletan pasca-inisiasi retak pada komposisi paduan ini mengindikasikan bahwa variasi tingkat keuletan lentur tetap berkaitan dengan variasi kualitas lokal hasil pengecoran. Komposisi paduan ini menunjukkan bahwa penambahan aluminium berpotensi menghasilkan kombinasi sifat mekanik yang lebih menguntungkan pada kondisi pengecoran tertentu (sebagaimana dicontohkan oleh Spesimen 3), meskipun secara umum kecenderungan kegagalan getas-mendadak pasca-inisiasi retak (Spesimen 1 dan 2) tetap lebih dominan dibandingkan pola perambatan bertahap yang lebih sering teramati pada kuningan 100%. Perbandingan menyeluruh

antar-kedua komposisi serta kaitannya dengan mekanisme kegagalan akan dibahas lebih lanjut pada Sub-bab 4.4.3 dan 4.4.4.

4.4.3 Data Hasil Pengujian Bending

1. Hasil Uji Bending Komposisi Kuningan 100%

*Tabel 4. 13 Hasil Uji Bending Komposisi Kuningan 100%
(Sumber: Penulis, 2026)*

Hasil Uji Tarik Kuningan 100%				
Spesimen	Load Max (kN)	D Max (mm)	Sudut Lentur (°)	Kondisi Retak
1	4,629	9,52	32	Retak pada permukaan cembung, belum terbuka lebar, porositas sekitar
2	5,423	10,31	35	Retak pada permukaan cembung, lebih terbuka lebar
3	6,142	10,50	37	Retak pada permukaan cembung, lebih rapat
Rata-rata	5,398	10,11	34	-

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

*Tabel 4. 14 Hasil Uji Bending Komposisi Kuningan 90% - Aluminium 10%
(Sumber: Penulis, 2026)*

Hasil Uji Tarik Kuningan 100%				
Spesimen	Load Max (kN)	D Max (mm)	Sudut Lentur (°)	Kondisi Retak
1	6,847	11,74	45	Retak pada permukaan cembung dan bercabang
2	7,053	14,29	52	Retak pada permukaan cembung berupa satu bukaan lokal yang dalam
3	8,613	17,51	54	Retak pada permukaan cembung berupa dua segmen terpisah, bergeser ke tepi spesimen
Rata-rata	7,504	14,51	50	-

3. Hasil Rata-rata Uji Bending

*Tabel 4. 15 Hasil Rata-rata Uji Bending Antar Komposisi
(Sumber: Penulis, 2026)*

Komposisi	Load Max (kN)	D Max (mm)	Sudut Lentur (°)
Aluminium 90%-Kuningan 10%	5,398	10,11	34
Aluminium 100%	7,504	14,51	50

Dari pengujian bending terhadap dua komposisi material, spesimen kuningan 100% menghasilkan rata-rata load max sebesar 5,398 kN, displacement max rata-rata 10,11 mm, dan sudut lentur rata-rata 34°, sebelum retak pertama muncul. Sementara spesimen kuningan 90% - aluminium 10% menghasilkan rata-rata yang lebih besar yaitu load max sebesar 7,504 kN, displacement max rata-rata 14,51 mm, dan sudut lentur rata-rata sekitar 50°. Perbedaan ini menunjukkan bahwa komposisi kuningan 90% - aluminium 10% unggul di seluruh parameter dibandingkan dengan kuningan 100%. Seluruh spesimen pada kedua komposisi, tanpa terkecuali, mengalami retak pada sudut lentur yang tergolong sedang ke tinggi dan menunjukkan pola kegagalan yang serupa, kurva *load-displacement* naik hingga bebas puncak, kemudian turun namun karakter penurunan dan pola visual retak antar spesimen bervariasi cukup signifikan.

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 spesimen dari kedua komposisi material menunjukkan pola kegagalan retak pertama pada rentang sudut lentur 32°-54°, disertai variasi karakter perambatan retak mulai dari penurunan bertahap hingga penurunan tajam mendadak yang berbeda-beda antar spesimen meskipun berasal dari komposisi yang identik.

1. Hubungan antara keuletan tarik dan keuletan lentur

Data regangan maksimum hasil uji tarik (Tabel 4.9–4.10) menunjukkan bahwa Kuningan 100% memiliki regangan rata-rata 8,109%, sedangkan kuningan 90%–aluminium 10% memiliki regangan rata-rata 9,042%. Kedua nilai ini diikuti oleh sudut lentur rata-rata yang tergolong sedang-tinggi pada uji bending (Tabel 4.15) sebesar 34° untuk kuningan 100% dan 50° untuk kuningan 90%–aluminium 10%. Karena satuan kedua parameter berbeda, keduanya tidak dapat dibandingkan sebagai satu rasio kesenjangan tunggal, namun secara kualitatif, keduanya bergerak searah komposisi dengan regangan tarik lebih tinggi (kuningan 90%–aluminium 10%) juga secara konsisten mencapai sudut lentur yang lebih besar sebelum retak muncul. Ini menunjukkan bahwa material pada penelitian ini tidak menunjukkan kontras tajam antara keuletan tarik dan keuletan lentur berbeda dengan pola pada sejumlah penelitian material getas, di mana sudut lentur dapat jatuh sangat rendah meski regangan tarik cukup baik.

2. Korelasi kapasitas beban dan sudut lentur antar spesimen

Pada kedua komposisi, teramati pola korelasi yang konsisten dan monotonik antara kapasitas beban maksimum (load max) dengan sudut lentur yang dicapai (Tabel 4.13–4.14). Pada komposisi Kuningan 100%, Spesimen 1 (4,629 kN) mencapai sudut 32°, Spesimen 2 (5,423 kN) mencapai 35°, dan Spesimen 3 (6,142 kN) mencapai 37°. Pola serupa teramati pada komposisi Kuningan 90%–Aluminium 10%, di mana Spesimen 1 (6,847 kN) mencapai 45°, Spesimen 2 (7,053 kN) mencapai 52°, dan Spesimen 3 (8,613 kN) mencapai 54°. Korelasi yang konsisten pada kedua komposisi ini mengindikasikan bahwa variasi sudut inisiasi

retak antar-spesimen pada komposisi yang sama kemungkinan besar disebabkan oleh variasi kualitas lokal hasil pengecoran (tingkat porositas atau homogenitas mikrostruktur yang berbeda pada tiap titik pengambilan sampel), bukan oleh perbedaan komposisi kimia

3. Pengaruh penambahan aluminium

Perbandingan antar-komposisi (Tabel 4.15) menunjukkan bahwa komposisi Kuningan 90%–Aluminium 10% secara konsisten unggul dibandingkan Kuningan 100% pada seluruh parameter bending, kapasitas beban rata-rata 39,03% lebih tinggi, *displacement* rata-rata 43,52% lebih tinggi, dan sudut lentur rata-rata 47,06% lebih besar. Pola ini sejalan dengan hasil uji tarik pada sub-bab 4.3.3 (Tabel 4.9 dan 4.10), yang juga menunjukkan keunggulan komposisi paduan kuningan 90% - aluminium 10% baik dari sisi kekuatan maupun keuletan. Dengan demikian penambahan aluminium 10% tidak hanya memperbaiki kekuatan dan keuletan material terhadap beban tarik searah, tetapi secara konsisten meningkatkan kemampuan material menahan konsentrasi regangan pada kondisi pembebanan lentur baik dari sisi kapasitas beban maupun sudut lentur yang dapat dicapai.

4. Keterbatasan Pengukuran

Karena penelitian ini tidak melakukan pengujian metalografi maupun komposisi kimia aktual pasca-cor, seluruh penjelasan mekanistik terkait pengaruh porositas dan homogenitas mikrostruktur terhadap variasi sudut lentur dan karakter retak di atas bersifat hipotesis yang memerlukan verifikasi lebih lanjut. 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).