

Pengaruh Penambahan Timah Hitam (Pb) Pada Paduan High-Tin Bronze Terhadap Kekuatan Tarik

Jonathan Ray Immanuel, I Ketut Gede Sugita, dan Dewa Ngakan Ketut Putra Negara

Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Perunggu bertimah tinggi (CuSn), khususnya yang mengandung lebih dari 17% timah putih (Sn), banyak digunakan pada industri seperti pembuatan gamelan dan lonceng karena memiliki sifat akustik yang sangat baik. Namun, material ini menghadapi kendala seperti harga pasar yang tinggi dan sifat getas, yang dapat menyebabkan retak saat proses penempaan maupun setelah digunakan. Penelitian ini mengkaji pengaruh penambahan timah hitam (Pb) terhadap kekuatan tarik dan struktur makro paduan perunggu bertimah tinggi. Pb dipilih karena harganya yang lebih rendah dibandingkan Sn serta kemampuannya mengurangi porositas dan meningkatkan sifat mekanik logam lain. Pb ditambahkan sebesar 5%, 10%, dan 15% untuk melihat pengaruhnya terhadap paduan. Uji tarik dilakukan, dilanjutkan dengan analisis patahan secara makro menggunakan kamera digital. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan Pb secara umum menurunkan sifat mekanik CuSn. Paduan tanpa Pb (0% Pb) memiliki kekuatan luluh rata-rata sebesar 103,4 MPa dan kekuatan tarik maksimum (UTS) sebesar 118,7 MPa, yang merupakan performa terbaik dan paling konsisten. Penambahan 5% Pb menurunkan kekuatan menjadi 73,7 MPa (kekuatan luluh) dan 102,2 MPa (UTS). Pada penambahan 10% Pb, hasil pengujian sangat bervariasi, kemungkinan akibat ketidakhomogenan. Paduan dengan 15% Pb menunjukkan sedikit pemulihan kekuatan, namun tetap lebih rendah daripada material dasar. Seluruh spesimen menunjukkan perilaku getas, tanpa perpanjangan atau penyusutan penampang, yang mengindikasikan tidak adanya deformasi plastis sebelum patah.

Kata kunci: Tembaga (Cu), timah putih (Sn), timah hitam (Pb), kekuatan tarik, makrostruktur

Abstract

High-tin bronze (CuSn), particularly those with over 17% tin (Sn), is commonly used in industries like gamelan and bell production due to its excellent acoustic properties. However, it faces challenges such as high market costs and brittleness, which can lead to cracking during forging or after use. This study examines the effect of lead (Pb) addition on the impact strength and macrostructure of high-tin bronze alloys. Pb was chosen for its lower cost compared to tin (Sn) and its ability to reduce porosity and improve the mechanical properties of other metals. Pb was added in quantities of 5%, 10%, and 15% to observe its effect on the alloy. Tensile tests were performed, followed by macrofracture analysis using a digital camera. The results revealed that Pb addition generally reduced the mechanical properties of CuSn. The alloy without Pb (0% Pb) had an average yield strength of 103.4 MPa and an ultimate tensile strength (UTS) of 118.7 MPa, showing the best performance and data consistency. With 5% Pb, strength decreased, yielding a yield strength of 73.7 MPa and UTS of 102.2 MPa. At 10% Pb, results were highly inconsistent due to possible inhomogeneity. The 15% Pb alloy showed a partial strength recovery but still fell short of the base material. All specimens exhibited brittle behavior, with no elongation or reduction in area, indicating no plastic deformation before fracture.

Keywords: Copper (Cu), white tin (Sn), lead (Pb), tensile strength, macrostructure

1. Pendahuluan

Tembaga adalah salah satu logam yang sangat dibutuhkan di dunia. Seiring dengan perkembangan zaman, tembaga tidak hanya diperlukan di bidang industri, tetapi juga di banyak bidang lainnya. Selain itu, manusia membutuhkan tembaga dengan sifat, karakteristik, dan bentuk yang sesuai dengan kebutuhan mereka. Beberapa di antaranya memerlukan tembaga dengan sifat korosi yang baik, daya tahan yang lebih tinggi, serta struktur atau bentuk tembaga yang tipis, melengkung, atau bercabang. Oleh karena itu, manusia mulai mencoba mencampurkan berbagai bahan yang cocok dengan tembaga untuk mendapatkan hasil bahan yang diinginkan.

Salah satu paduan tembaga yang paling sering digunakan adalah perunggu yaitu merupakan paduan

logam tembaga (Cu) dengan timah putih (Sn). Perunggu memiliki paduan timah putih dengan kuantitas komposisi yang beragam. Paduan perunggu biasanya dibagi menjadi dua bagian, yaitu: perunggu dengan kadar timah rendah, *low-tin bronze* (kurang dari 17%) dan perunggu dengan kadar timah tinggi, *high-tin bronze* (lebih dari 17%) [1]. Paduan perunggu dengan kandungan timah yang tinggi (*high-tin bronze*) memiliki sifat akustik yang baik sehingga banyak dipakai sebagai bahan utama dalam pembuatan alat-alat musik, contohnya adalah lonceng dan gamelan [1]. Dibalik sifat akustiknya yang baik, *high-tin bronze* cenderung lebih getas sehingga akan mudah mengalami keretakan jika dipakai ke alat yang membutuhkan fleksibilitas. Berkebalikan dengan saudaranya, *low-tin bronze* memiliki kepadatan yang lebih lunak daripada *high-tin bronze* sehingga mempunyai sifat fleksibilitas yang baik. Walau begitu

high-tin bronze jauh lebih kuat daripada *low-tin bronze* yang membuat *high-tin bronze* lebih banyak dipakai dalam aplikasi yang membutuhkan kekuatan, ketahanan korosi dan aus yang baik.

Seperti yang ditunjukkan dalam penelitian sebelumnya [2] bahwa penambahan Pb dapat meningkatkan kekerasan paduan perunggu. Selain itu, timah hitam memperbaiki kemampuan mesin paduan dengan memberikan sifat pelumas dan memudahkan proses pemesinan, yang penting dalam aplikasi industri [3]. *High-tin bronze* dengan penambahan timah hitam digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti bantalan dan komponen yang memerlukan kekuatan dan ketahanan aus yang baik [4]. Dengan memvariasikan konsentrasi timah hitam, dapat menemukan komposisi optimal yang meningkatkan kekuatan tarik tanpa mengorbankan sifat lainnya, seperti kemampuan mesin dan kekuatan [4].

Penelitian mengenai penambahan timah hitam (Pb) ke dalam paduan *high-tin bronze* bertujuan untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap kekuatan tarik dan struktur makro porositas patahan, mengingat *high-tin bronze* meskipun memiliki kekuatan dan ketahanan korosi yang baik [5], cenderung menjadi rapuh saat kandungan timah putihnya terlalu tinggi, sehingga kurang ideal untuk aplikasi yang memerlukan fleksibilitas. Sebagai logam berat, timah hitam memiliki sifat yang lebih lunak dan mudah dibentuk [6] dan penambahannya dalam paduan logam, seperti paduan tembaga, sering dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanik dan fisik material tersebut. Timah hitam berfungsi sebagai penguat yang dapat meningkatkan kekuatan tarik dan ketahanan terhadap deformasi, serta mampu meningkatkan kemampuan pemrosesan material, yang penting dalam aplikasi industri [7] [8].

Pengujian kekuatan tarik dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan material dalam menahan beban tarik sebelum mengalami deformasi permanen atau patah. Kekuatan tarik merupakan parameter penting dalam desain dan aplikasi teknik, terutama dalam industri yang memerlukan material dengan daya tahan tinggi, seperti otomotif, konstruksi, dan elektronik. Misalnya, dalam penelitian oleh Siregar, pengujian kekuatan tarik dilakukan untuk mengevaluasi komposit yang menggunakan resin epoxy dan serat kulit singkong, yang menunjukkan bagaimana variasi komposisi dapat mempengaruhi kekuatan tarik material tersebut [9]. Implikasi dari pengujian ini sangat luas, termasuk dalam pengembangan material baru dan optimasi proses produksi.

Hasil uji tarik pada paduan Cu-Sn memperlihatkan bahwa peningkatan kandungan timah (Sn) secara signifikan memengaruhi kekuatan tarik dan plastisitas. Misalnya, pada paduan Cu-10Sn, peningkatan kandungan timah meningkatkan kekuatan tarik dari 382 MPa pada Cu-5Sn menjadi 738 MPa pada Cu-15Sn, tetapi mengurangi elongasi dari 26% menjadi 9% [10]. Peningkatan kekuatan ini

disebabkan oleh terbentuknya fasa intermetalik keras seperti δ -Cu₄₁Sn₁₁, yang menambah kekuatan tetapi mengurangi plastisitas. Perubahan-perubahan tersebut sangat dipengaruhi oleh struktur mikro yang terbentuk selama proses manufaktur, khususnya teknik *casting* dan *Selective Laser Melting* (SLM).

Untuk mengatasi kekurangan dari *high-tin bronze*, berbagai teknik pembuatan paduan perunggu dapat digunakan. Salah satunya adalah *Selective Laser Melting* (SLM), sebuah metode additive manufacturing atau yang biasanya kita kenal sebagai 3D printing di mana serbuk logam dilelehkan secara selektif menggunakan sinar laser berenergi tinggi. Teknik ini memungkinkan produksi paduan dengan mikrostruktur yang lebih halus dan distribusi elemen paduan yang lebih homogen, mengurangi risiko segregasi dan pembentukan fasa rapuh yang sering terjadi pada *high-tin bronze* yang diproses melalui metode konvensional seperti pengecoran. SLM juga memungkinkan kontrol yang lebih baik terhadap parameter solidifikasi, yang dapat meningkatkan kekuatan tanpa mengorbankan fleksibilitas [10].

Penelitian terdahulu umumnya berfokus pada pengaruh penambahan timah hitam terhadap sifat mekanik material yang berbeda [11], seperti paduan aluminium atau tembaga, dan sering kali tidak mempertimbangkan variasi komposisi yang lebih luas atau aplikasi spesifik. Sebagai contoh, penelitian oleh Hermawan mengenai pengaruh penambahan timah hitam (Pb) sebesar 20% pada pengecoran menggunakan bahan aluminium, tetapi tidak secara spesifik membahas kekuatan tarik [12].

Berdasarkan data penelitian di atas, sangat krusial untuk memahami sifat mekanis dari suatu logam, khususnya pada paduan perunggu. Dengan mengetahui sifat mekanis logam, diharapkan penelitian ini dapat menghasilkan paduan logam yang memiliki kualitas tinggi. Oleh sebab itu, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan timah hitam (Pb) pada paduan *high-tin bronze* terhadap kekuatan tarik dan struktur makro porositas material tersebut.

Pemilihan variasi penambahan timah hitam (Pb) sebesar 5%, 10%, dan 15% pada paduan *high-tin bronze* (80Cu20Sn) didasarkan pada beberapa pertimbangan [2]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penambahan timah hitam dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan paduan perunggu [2]. Dengan menambahkan timah hitam dalam variasi yang berbeda, dapat mempelajari bagaimana perubahan konsentrasi timah hitam mempengaruhi sifat mekanik paduan, terutama kekuatan tarik. Selain itu, timah hitam berfungsi sebagai pelumas dan memperbaiki kemampuan mesin paduan, membuatnya lebih mudah untuk diproses [13]. Variasi konsentrasi yang berbeda memungkinkan peneliti untuk menemukan titik optimal antara biaya dan kinerja. Penambahan timah hitam juga dapat mempengaruhi struktur mikro paduan, seperti distribusi butir dan fase yang terbentuk

[14]. Dalam beberapa paduan, penambahan timah hitam dapat mencapai hingga 30% untuk aplikasi tertentu, seperti pada high-lead tin bronze yang digunakan dalam aplikasi bantalan [3]. Memilih variasi 5%, 10%, dan 15% timah hitam memungkinkan peneliti untuk memperluas rentang penelitian dan memahami bagaimana penambahan timah hitam dalam jumlah yang lebih kecil mempengaruhi sifat paduan, sehingga dapat menemukan konsentrasi optimal yang meningkatkan kekuatan tarik paduan high-tin bronze [14] [4].

2. Dasar Teori

2.1. Pengujian Kekuatan Tarik

Pengujian kekuatan tarik adalah metode untuk mengevaluasi sifat mekanik material, seperti kekuatan tarik maksimum (*Ultimate Tensile Strength* / UTS), tegangan luluh (*Yield Strength*), regangan (*Strain*), dan modulus elastisitas. Uji ini mengukur kemampuan material menahan gaya tarik hingga putus, serta memberikan informasi tentang perilaku elastis dan plastis material.

Pengujian dilakukan menggunakan JIS Z2201. Spesimen ditarik secara *uniaxial* sampai patah, dengan kurva tegangan-regangan direkam untuk analisis.

Tahapan deformasi pada uji tarik:

1. Deformasi elastis – material kembali ke bentuk awal setelah beban dilepas.
2. Titik luluh (*yield point*) – peralihan dari elastis ke plastis.
3. Deformasi plastis – terjadi perubahan bentuk permanen.
4. Fraktur – material putus karena tidak mampu menahan beban.

2.2. Parameter Hasil Uji Tarik

Beberapa parameter yang dianalisis meliputi:

1. *Ultimate Tensile Stress* (σ_u):

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A_0} \dots\dots\dots(1)$$

σ_u = Kekuatan tarik maksimum (*Ultimate Tensile Stress*) (MPa)

F_u = Gaya maksimum yang diterapkan pada spesimen selama pengujian kekuatan tarik (N)

A_0 = Luas penampang spesimen awal (mm²)

2. *Yield Strength* (σ_y):

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_0} \dots\dots\dots(2)$$

σ_u = Kekuatan luluh (*Yield Strength*) (MPa)

F_u = Gaya yang diterapkan pada spesimen hingga mencapai titik luluh (N)

A_0 = Luas penampang spesimen awal (mm²)

3. Modulus Elastisitas (E):

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \dots\dots\dots(3)$$

E = Modulus elastisitas (N/m²)

σ = Tegangan (*Stress*) (MPa)

ϵ = Regangan (*Strain*)

4. *Fracture Stress* (σ_f):

$$\sigma_f = \frac{F_f}{A_f} \dots\dots\dots(4)$$

σ_f = Tegangan patah (*Fracture Stress*) (MPa)

F_f = Gaya (maksimum) yang menyebabkan patah (N)

A_f = Luas penampang akhir material pada titik patah (mm²)

2.3. Standar Uji Tarik

Penelitian ini menggunakan JIS Z2201 dikarenakan populer di Asia, khususnya Jepang, dengan prosedur ketat dan hasil yang dapat diandalkan.

Patahan spesimen harus terjadi di area *gauge length*. Patahan terlalu dekat kepala spesimen dapat memengaruhi keakuratan hasil.

2.4. Uji Metalografi dan Analisis Struktur Makro

Uji metalografi meliputi proses pemotongan, *mounting*, *grinding*, *polishing*, dan etsa untuk mengamati mikrostruktur material. Analisis makro dilakukan dengan kamera digital untuk mempelajari pola patahan. Teknik etsa memperjelas batas butir dan fasa, membantu memahami pengaruh komposisi paduan terhadap sifat mekanik dan mode patahan.

3. Metode Penelitian

Dalam penelitian ini metode yang digunakan yaitu eksperimental. Metode eksperimental digunakan untuk mengamati langsung sifat mekanik dan struktur makro paduan *high-tin bronze* yang ditambahkan variasi komposisi timah hitam (Pb) sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15%.

3.1. Alat dan Bahan

Bahan penelitian ini menggunakan paduan *high-tin bronze* yang terdiri dari 80% tembaga (Cu) dan 20% timah putih (Sn), dengan variasi penambahan timah hitam (Pb) sebesar 5%, 10%, dan 15%. Selain itu, digunakan pula bahan pendukung berupa tanah lempung, dan papan kayu. Spesimen uji dibuat sesuai dengan standar uji tarik JIS Z2201 No.7. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi tungku krusibel, termokopel tipe K, cetakan tanah, kowi, timbangan digital, jangka sorong, gergaji, mesin uji tarik universal (UTM), serta mesin frais.

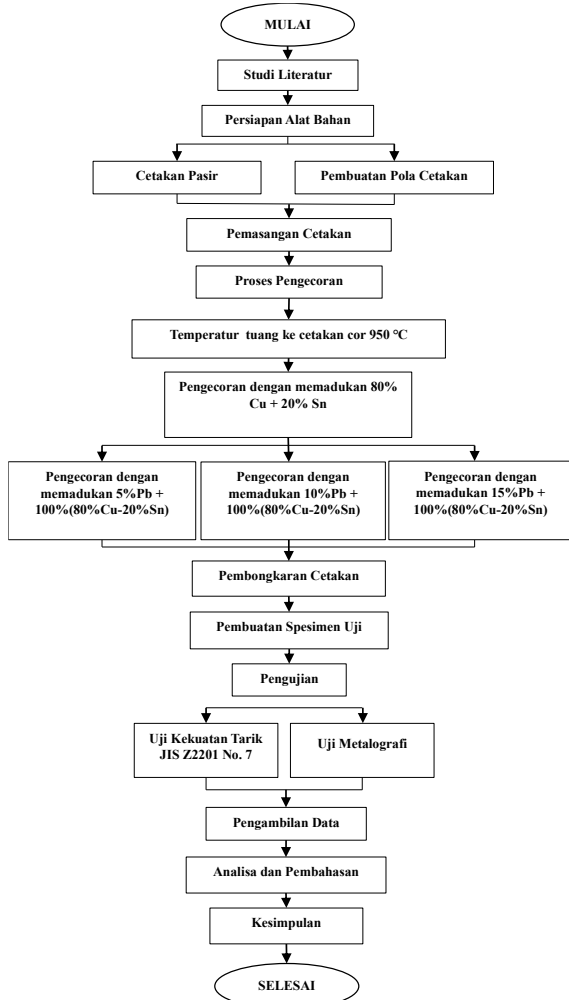
3.2. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini meliputi studi literatur, persiapan alat dan bahan, pembuatan cetakan menggunakan *software* SolidWorks, proses pengecoran dengan metode *sand casting*, pengujian

(kekuatan tarik dan metalografi), serta analisis data hasil pengujian.

3.3. Diagram Alir Penelitian

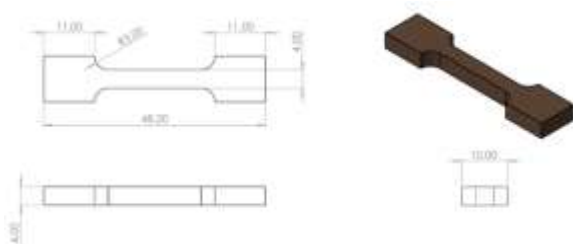
Berikut adalah alir dari penelitian yang dimulai dari pencarian bahan hingga pengolahan dan analisis data.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

3.4. Uji Kekuatan Tarik

Pengujian kekuatan tarik dilakukan terhadap empat variasi komposisi paduan *high-tin bronze*, masing-masing direpresentasikan oleh tiga spesimen uji. Uji tarik ini mengacu pada standar JIS Z2201 No.7, dengan spesimen berdimensi $(48,20 \times 10 \times 4)$ mm, radius *fillet* (leher) R3, dan *gauge length* berukuran $(26,2 \times 4 \times 4)$ mm, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 2. Spesimen Uji Tarik

3.5. Uji Metalografi

Metalografi merupakan cabang ilmu yang mempelajari karakteristik struktur makro dan mikro dari logam atau paduan logam guna memahami hubungan antara struktur dan sifat material tersebut [15]. Pengujian metalografi merupakan proses analisis terhadap struktur dan komponen fisik logam atau paduan, baik melalui pengamatan visual langsung maupun dengan bantuan alat seperti mikroskop optik. Pengamatan struktur makro dilakukan untuk mengidentifikasi karakteristik struktur makro dari material paduan 80%Cu–20%Sn yang telah ditambahkan timah hitam (Pb) setelah uji tarik. Dokumentasi struktur makro spesimen dilakukan dengan menggunakan kamera digital, dengan spesifikasi sebagai berikut:

1. Resolusi kamera : 24 MP
2. *Focal length* : 13 mm
3. *Aperture* : f/2,2
4. ISO : 40
5. *Exposure* : 1,3 EV
6. *Shutter speed* : 1/268 s

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Hasil Uji Kekuatan Tarik

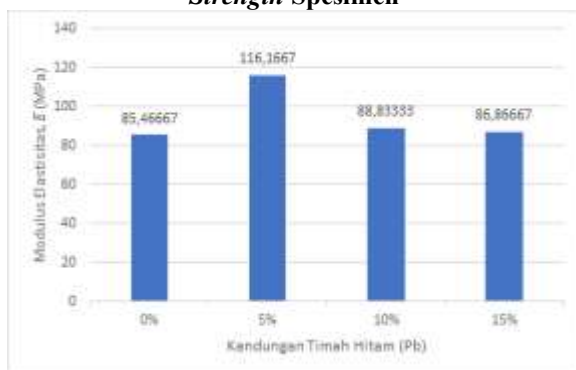
Dari proses uji tarik yang telah dilakukan didapatkan bahwa dengan menambahkan variasi komposisi timah hitam (Pb) pada paduan *high-tin bronze* cenderung menurunkan nilai kekuatan tarik dari paduan tersebut dibandingkan paduan *high-tin bronze* tanpa kandungan timah hitam (Pb). Adapun nilai hasil uji kekuatan tarik dapat dilihat pada gambar-gambar di bawah ini.



Gambar 3. Grafik Rata-rata Yield Strength Spesimen



Gambar 4. Grafik Rata-rata *Ultimate Tensile Strength* Spesimen



Gambar 5. Grafik Rata-rata Modulus Elastisitas Spesimen



Gambar 6. Grafik Rata-rata *Fracture Stress* Spesimen

Berdasarkan pengujian kekuatan tarik paduan CuSnPb terbukti bahwa penambahan timah hitam (Pb) cenderung menurunkan kekuatan tarik pada paduan *high-tin bronze*. Material CuSn murni (0% Pb) menunjukkan performa terbaik dengan *yield strength* rata-rata 103,4 MPa dan *ultimate tensile stress* rata-rata 118,7 MPa, serta konsistensi data yang relatif baik. Sedangkan, penambahan 10% Pb menunjukkan variabilitas yang sangat tinggi dengan rentang *yield strength* dari 29,18 hingga 142,12 MPa, hal tersebut menunjukkan ketidakstabilan sifat mekanik pada komposisi ini.

Analisis modulus elastisitas mengungkap fenomena yang sangat signifikan dalam penelitian ini. Material CuSn murni memiliki modulus elastisitas rata-rata 85,5 MPa. Setelah penambahan 5% Pb, rata-rata modulus elastisitas meningkat menjadi 116,17 MPa, dengan nilai individu spesimen berkisar antara

75,40 hingga 188,00 MPa. Pada komposisi 10% dan 15% Pb, nilai modulus elastisitas masing-masing adalah 88,8 MPa dan 86,9 MPa, atau mendekati nilai material dasar. Fenomena ini menunjukkan adanya mekanisme kompleks pada interaksi antara Pb dengan matriks CuSn, yang menghasilkan variasi nilai modulus elastisitas cukup lebar [16], terutama pada kadar penambahan Pb tertentu (5%). Variasi ini memerlukan analisis lebih lanjut seperti analisis mikrostruktur agar spesimen dapat dipahami lebih baik.

Variabilitas data yang tinggi, terutama pada komposisi 10% Pb, mengindikasikan adanya masalah dalam proses manufaktur atau homogenisasi material. Segregasi Pb dalam matriks CuSn kemungkinan menjadi penyebab utama ketidakkonsistenan ini. Distribusi fase Pb yang tidak merata dapat menciptakan titik-titik lemah dalam struktur material, menyebabkan perubahan variasi kekuatan yang signifikan antar spesimen [17], [18]. Hal ini juga menjelaskan mengapa beberapa spesimen menunjukkan kekuatan yang sangat rendah sementara yang lain masih mempertahankan kekuatan yang relatif tinggi.

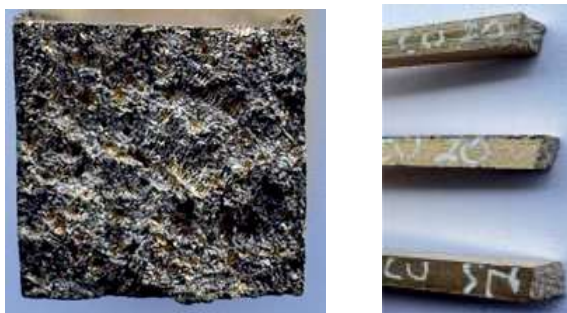
Dari sudut pandang aplikasi industri, material CuSn-Pb memiliki karakteristik yang sesuai untuk digunakan dalam aplikasi struktural yang memerlukan kekuatan tinggi tanpa memerlukan keuletan. Sifat getas yang konsisten di seluruh komposisi menjadikan material ini kurang tepat untuk aplikasi yang melibatkan beban dinamis atau memerlukan kemampuan deformasi. Namun, untuk aplikasi yang melibatkan beban statis atau komponen yang membutuhkan kekakuan tinggi, khususnya pada komposisi CuSn murni, material ini bisa menjadi pilihan yang tepat.

Berdasarkan analisis data yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penambahan Pb pada CuSn cenderung menurunkan sifat mekanik material dan meningkatkan variabilitas data. CuSn murni menunjukkan performa terbaik dengan konsistensi yang paling baik, sedangkan komposisi 10% Pb menunjukkan performa yang paling tidak konsisten. Untuk aplikasi praktis, disarankan untuk menggunakan CuSn murni apabila tidak ada pertimbangan khusus lainnya. Namun, jika penambahan Pb diperlukan untuk tujuan tertentu, komposisi 15% Pb memberikan stabilitas yang lebih baik dibandingkan dengan komposisi 5% dan 10% Pb. Perbaikan dalam proses manufaktur, terutama dalam homogenisasi dan kontrol temperatur, sangat penting untuk mengurangi variabilitas data serta meningkatkan konsistensi sifat mekanik material.

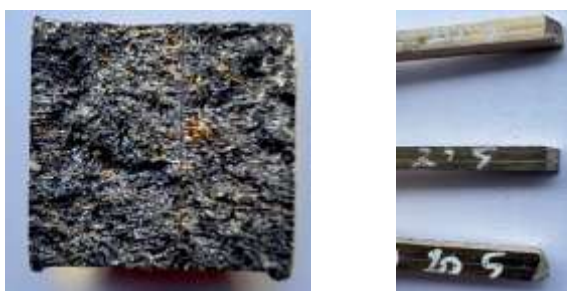
4.2. Hasil Uji Metalografi

Pada pengamatan struktur patahan makro setelah spesimen diuji tarik, penelitian ini dilakukan dengan mengamati patahan-patahan yang terjadi pada spesimen menggunakan kamera digital.

Berikut adalah hasil pengamatan struktur makro patahan



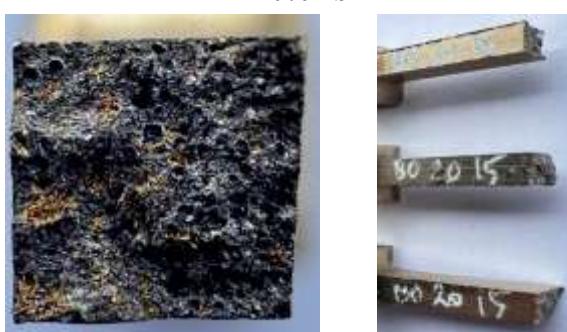
Gambar 7. Foto Makro Patahan High-Tin Bronze Murni



Gambar 8. Foto Makro Patahan High-Tin Bronze + 5% Pb



Gambar 9. Foto Makro Patahan High-Tin Bronze + 10% Pb



Gambar 10. Foto Makro Patahan High-Tin Bronze + 15% Pb

Berdasarkan gambar hasil pengamatan struktur makro hasil patahan uji tarik paduan *high-tin bronze* dan variasi timah hitam terlihat bahwa permukaan spesimen patahan cenderung kasar dan memiliki permukaan yang tidak merata, hal tersebut menjelaskan bahwa spesimen cenderung mengalami putus secara langsung ketika dilakukan uji tarik. Dimana hasil foto pengamatan struktur makro tersebut

membuktikan bahwa spesimen CuSnPb menunjukkan karakteristik getas (*brittle*).

5. Kesimpulan

Penambahan Pb cenderung menurunkan kekuatan mekanik paduan CuSn. Paduan tanpa Pb (0% Pb) memiliki *yield strength* rata-rata 103,4 MPa dan *ultimate tensile strength* (UTS) 118,7 MPa, yang dimana hal tersebut menunjukkan performa terbaik dan konsistensi data tertinggi. Dengan penambahan Pb 5%, kekuatan material menurun, dengan *yield strength* rata-rata 73,7 MPa dan UTS 102,2 MPa. Pada komposisi 10% Pb, hasil pengujian sangat variatif, yang mungkin disebabkan oleh ketidakhomogenan material. Sementara itu, penambahan 15% Pb menunjukkan pemulihan parsial kekuatan, namun belum dapat menyamai kekuatan material dasar. Semua spesimen menunjukkan sifat getas (*brittle*), tanpa adanya elongasi atau *reduction of area*, yang mengindikasikan bahwa material tidak mengalami deformasi plastis sebelum patah.

Daftar Pustaka

- [1] S. Slamet and Suyitno, "Pengaruh Komposisi dan Temperatur Ruang terhadap Fluiditas Paduan Perunggu Timah Melalui Investment Casting," 2017.
- [2] I. G. Suarjaya, I. K. G. Sugita, and D. N. K. P. Negara, "Pengaruh Penambahan Timah Hitam (Pb) Pada Paduan High-Tin Bronze Terhadap Kekerasan," *Jurnal Ilmiah Teknik Desain Mekanika*, vol. 13, no. 3, pp. 261–265, 2024.
- [3] Wieland Concast, "C93900 Alloy, C939 High-leaded Tin Bronze," *Concast.Com*, 2018.
- [4] X. yan Ren, X. Zhang, X. Hong, and J. Ren, "Microstructure Analysis and Mechanical Properties of Phosphorus-reinforced ZCuPb20Sn5 Alloy," *Sci Rep*, vol. 9, no. 1, Dec. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-49441-1.
- [5] R. Konečná and S. Fintová, "Copper and Copper Alloys: Casting, Classification and Characteristic Microstructures," 2012, [Online]. Available: <http://jeanes.webnode.sk/prvky/med/>
- [6] W. D. Callister Jr. and D. G. Rethwisch, "Materials Science and Engineering: An Introduction (10th ed.)," 2018.
- [7] T. Lapailaka- *et al.*, "Studi Pengaruh Penambahan Timah Hitam Terhadap Struktur Kristal Lapisan Lipis PZT di Daerah Morphotropic Phase Boundary (MPB)"
- [8] D. Prayitno and F. A. Apriandini, "Pengaruh Waktu Tahan pada Proses Artificial Aging terhadap Mikrostruktur Paduan Al-Sn-Cu,"

Jurnal Penelitian Dan Karya Ilmiah Lembaga Penelitian Universitas Trisakti, 2020.

- [9] I. Randi Siregar, M. Fa'iz Alfatih, and S. Alimi, "Eksperimen Uji Kekuatan Tarik Komposit dengan Resin Epoxy dan Penguat Serat Kulit Singkong Menggunakan Metode Hand Lay Up," *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, vol. 8, no. 2, pp. 220–226, Nov. 2022, doi: 10.56521/teknika.v8i2.610.
- [10] P. Yang *et al.*, "Study of the Microstructure and Mechanical Properties of Cu–Sn Alloys Formed by Selective Laser Melting with Different Sn Contents," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 24, pp. 5476–5485, May 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.04.198.
- [11] I. K. G. Sugita, C. Istri Putri Kusuma Kencanawati, and dan I. Gusti Ngurah Priambadi, "Application Temperature Annealing on Brittle Fracture Prevention on Balinese Gamelan Made of Bronze," *Prosiding SNTTM*, pp. 73–76, 2017.
- [12] Hermawan, S. M. Agus Yulianto, and Rian Candra, "Pengaruh Penambahan Timah Hitam (Pb) Sebesar 20% Pada Pengecoran Menggunakan Bahan Aluminium Ukuran 10x10 Cm dengan Media Cetak Pasir Merah," 2019.
- [13] G. Kuhlmann, "The role of Lead in Copper, Brass and Bronze," *Stone Chemical Company*, Jan. 2022.
- [14] A. S. Saraiva, E. Figueiredo, H. Águas, and R. J. C. Silva, "Characterisation of Archaeological High-tin Bronze Corrosion Structures," *Studies in Conservation*, vol. 67, no. 4, pp. 222–236, 2022, doi: 10.1080/00393630.2020.1857523.
- [15] J. Rais and E. Listijorini, "Karakterisasi Kekerasan dan Struktur Mikro Baja Aisi 410 pada Proses Tempering dengan variasi media penidngin," *Jurnal ROTOR*, vol. 13, no. 2, 2020.
- [16] Z. F. Wu, Z. Y. Zhu, and R. Wu, "Thermodynamic Analysis of Nanocrystalline Solid Solutions Formation in Copper-lead-tin Ternary Immiscible System During Mechanical Alloying," *Materwiss Werksttech*, vol. 52, no. 12, pp. 1328–1337, 2021.
- [17] M. M. Rahman and Ahmed S Reaz, "Effects of Work-hardening and Post Thermal-treatment on Tensile Behaviour of Solder-affected Copper," *Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 237, no. 5, pp. 981–1005, 2022.
- [18] W. Y. Wong, R. A. Shamsudin, M. F. M. Nazeri, and M. N. Masri, "The Preliminary Study of the Addition Zinc in Tin-Copper Lead Free Solder," *Material Science Forum*, pp. 104–108, 2020.



Jonathan Ray Immanuel adalah mahasiswa yang sedang menempuh pendidikan sarjana strata 1 Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana yang memiliki ketertarikan dan fokus pada bidang rekayasa manufaktur dan material.



Dr. Ir. I Ketut Gede Sugita, MT. adalah dosen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Udayana, lahir pada 14 April 1966. Menyelesaikan SMA di SMAN 1 Klungkung (1985), Sarjana Teknik Mesin di Universitas Udayana (1990), Magister Teknik Mesin bidang Manufaktur di ITS (2001), dan Doktor bidang Mekanika Bahan di UGM (2012). Sejak 2012 aktif mengajar mata kuliah seperti Proses Produksi, Pemilihan Bahan, Mekanika Kekuatan Material, dan Analisa Kegagalan Material, serta Manajemen Manufaktur di program magister. Aktif dalam tri dharma perguruan tinggi, khususnya penelitian dan publikasi di bidang Mekanika Bahan dan material non-ferro.