

STUDI VARIASI PENAMBAHAN UNSUR TEMBAGA (CU) TERHADAP PENYUSUTAN, KOMPOSISI KIMIA, *DENSITY*, KEKERASAN, DAN STRUKTUR MIKRO PADA PENGECORAN LOGAM ALUMINIUM DALAM PROSES *INVESTMENT CASTING*

Deni Ardiansyah, Patna Partono

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta

Abstrak

Pengecoran *investment casting* merupakan metode pembuatan komponen logam presisi dengan menggunakan cetakan yang dapat dilebur, aluminium paduan tembaga memiliki keunggulan karena sifat mekanik dan ketahanan korosinya yang tinggi. Proses ini dilakukan dengan menggunakan lilin yang dilapisi dengan *gypsum*, kemudian meninggalkan rongga untuk pengecoran logam. *Investment casting* memiliki keunggulan yaitu dapat menghasilkan hasil presisi yang tinggi dan bentuk yang akurat. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi penambahan unsur tembaga terhadap penyusutan, komposisi kimia, *density*, kekerasan, dan struktur mikro. Penelitian ini dimulai dengan studi literatur, persiapan alat dan bahan, persiapan *investment casting*, pengecoran, hingga dilakukannya proses pengujian yang meliputi pengujian penyusutan, komposisi kimia, *density*, kekerasan, dan struktur mikro. Hasil pengujian didapatkan, ada penyusutan panjang pada spesimen 1 variasi 0% sebesar 0.8611 mm, pada spesimen 2 variasi 5% sebesar 0.8494 mm, pada spesimen 3 variasi 10% sebesar 0.8463 mm. Pada penyusutan luas pada spesimen 1 variasi 0% sebesar 39.4376 mm², pada spesimen 2 variasi 5% sebesar 38.6971 mm², pada spesimen 3 variasi 10% sebesar 37.4387 mm². Pada penyusutan volume pada spesimen 1 variasi 0% sebesar 683.2565 mm³ pada spesimen 2 variasi 5% sebesar 683.1970 mm³, pada spesimen 3 variasi 10% sebesar 679.7142 mm³. Sedangkan pada persentase penyusutan terdapat hasil nilai pada spesimen 1 variasi 0% sebesar 3.04%, pada spesimen 2 variasi 5% sebesar 2.08%, pada spesimen 3 variasi 10% sebesar 1.20%. Hasil Pengujian Komposisi Kimia pada spesimen 1 variasi 0% mengandung serbuk tembaga (Cu) sebesar 0,287%, pada spesimen 2 variasi 5% penambahan serbuk tembaga (Cu) sebesar 0,833%, pada spesimen 3 variasi 10% penambahan serbuk tembaga (Cu) sebesar 0,756%. Hasil pengujian *density* pada spesimen 1 variasi 0% mendapatkan hasil 2,71 g/cm³, pada spesimen 2 variasi 5% penambahan serbuk tembaga (Cu) mendapatkan hasil 2,85 g/cm³, pada spesimen 2 variasi 5% penambahan serbuk tembaga (Cu) mendapatkan hasil 2,97 g/cm³. Hasil pengujian kekerasan pada spesimen 1 variasi penambahan serbuk tembaga (Cu) 0% sebesar 7,31 VHN, pada spesimen 2 variasi penambahan serbuk tembaga (Cu) 5% sebesar 7,62 VHN, pada spesimen 3 variasi penambahan serbuk tembaga (Cu) 10% sebesar 6,54 VHN. Hasil pengujian struktur mikro bahwa pada tiap variasi memiliki unsur yang saling mengikat seperti Cu-Mg-Al yang terdiri jaringan berbentuk bintik – bintik yang menyebar merata, CuMgAl₂ yang berbentuk seperti percabangan pohon yang terarah dengan warna abu abu. Cu₂FeAl₇ yang berbentuk bilah memanjang dengan warna abu – abu sedang. Cu₂Mg₈Si₆Al₅ yang berbentuk skrip/aksara yang berwarna abu-abu muda. Cu₃NiAl₆ yang berbentuk seperti aksara dan berwarna abu – abu terang. Al berwarna abu abu paling terang dan paling banyak.

Kata Kunci : *Investment Casting*, Aluminium, Tembaga, Penyusutan, Komposisi Kimia, *Density*, Kekerasan, Struktur Mikro

Abstract

Investment casting is a method of manufacturing precision metal components using a fusible mold, copper alloy aluminum has advantages due to its high mechanical properties and corrosion resistance. This process is carried out using wax coated with *gypsum*, then leaving a cavity for casting metal. *Investment casting* has the advantage that it can produce high precision results and accurate shapes. The purpose of this study is to determine the effect of variations in the addition of copper elements on shrinkage, chemical composition, *density*, hardness, and microstructure. This research begins with a literature study, preparation of tools and materials, preparation of *investment casting*, *casting*, until the testing process which includes testing shrinkage, chemical composition, *density*, hardness, and microstructure. The test results obtained, there is a length shrinkage in specimen 1 0% variation of 0.8611 mm, in specimen 2 5% variation of 0.8494 mm, in specimen 3 10% variation of 0.8463 mm. In area shrinkage in specimen 1 0% variation amounted to 39.4376 mm² in specimen 2 5% variation amounted to 38.6971mm², in specimen 3 10% variation amounted to 37.4387 mm² In volume shrinkage in specimen 1 0% variation amounted to 683.2565 mm³ in specimen 2 5% variation amounted to 683.1970 mm³ in specimen 3 10% variation amounted to 679.7142 mm³. While in the percentage of shrinkage there is a value in specimen 1 0% variation of 3.04%, in specimen 2 5% variation of 2.08%, in specimen 3 10% variation of 1.20%. The results of Chemical Composition Testing in specimen 1 0% variation contains copper powder (Cu) of 0.287%, in specimen 2 5% variation of copper powder addition (Cu) of 0.833%, in specimen 3 10% variation of copper powder addition (Cu) of 0.756%. The results of *density* testing on specimen 1 0% variation obtained the results of 2.71 g/cm³ on specimen 2 5% variation of copper powder addition (Cu) obtained the results of 2.85 g/cm³ on specimen 2 5% variation of copper powder addition (Cu) obtained the results of 2.97 g/cm³. The results of hardness testing on specimen 1 variation of adding copper powder (Cu) 0% of 7.31 VHN, on specimen 2 variation of adding copper powder (Cu) 5% of 7.62 VHN, on specimen 3 variation of adding copper powder (Cu) 10% of 6.54 VHN. The results of microstructure testing show that each variation has elements that bind together such as Cu-Mg-Al which consists of a network of spots that spread evenly, CuMgAl₂ which is shaped like a directed tree branching with a gray color. Cu₂FeAl₇ which is in the form of elongated blades with a medium gray color. Cu₂Mg₈Si₆Al₅ which is shaped like a script / script with a light gray color. Cu₃NiAl₆ which is shaped like a script and is light gray in color. Al is the lightest and most abundant gray.

Keywords: *Investment Casting*, Aluminum, Copper, Shrinkage, Chemical Composition, *Density*, Hardness, Microstructure

1. PENDAHULUAN

Penggunaan Aluminium antara lain untuk pembuatan kabel, kerangka kapal terbang, mobil dan berbagai produk peralatan rumah tangga. Senyawanya dapat digunakan sebagai obat, penjernih air, fotografi serta sebagai ramuan cat, bahan pewarna, amplas dan permata sintesis. Aluminium murni adalah logam yang lunak, tahan lama, ringan, dan dapat ditempa dengan penampilan luar bervariasi antara keperakan hingga abu-abu,

tergantung kekasaran permukaannya. Alumunium yang bersifat ringan, konduktif, dan kuat terhadap oksigen dapat menjadi bahan yang baik untuk digunakan dalam melakukan penelitian (Li *et al.*, 2022).

Pengecoran logam merupakan salah satu teknik pembuatan sebuah produk dengan cara memanaskan logam sampai cair di dalam tungku peleburan kemudian logam cair tersebut dituangkan ke dalam cetakan yang sudah dibuat yang sudah serupa dengan produk yang akan dibuat dengan bentuk benda aslinya. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi proses pengecoran logam sehingga hasil coran tersebut dapat dikatakan baik diantaranya perpindahan panas selama pembekuan dan pendinginan dari logam cair dalam cetakan, terdapat aliran logam cair di dalam rongga cetak, pembekuan logam dari kondisi cair, pengaruh penggunaan material cetakan (Ja'far Baihaqi, Dika and Mashudi, 2021). Proses pengecoran ini banyak dilakukan karena proses ini mempunyai keunggulan diantaranya adalah mampu menghasilkan produk dengan geometri yang rumit dengan proses yang ekonomis (Sulardjaka, A., Suprihanto, Y., Umardani, P., 2010)

Investment casting atau dikenal juga *lost wax casting* adalah salah satu metode pengecoran logam yang sudah digunakan sejak beberapa abad yang lalu. Metode ini dikenal dengan kemampuannya untuk memproduksi suatu komponen dengan permukaan yang baik, akurasi dimensi yang tinggi, dan bentuk yang kompleks. *Investment casting* ini sangat berguna untuk membuat bentuk-bentuk yang sukar untuk di mesin. *Investment casting* telah digunakan untuk membuat senjata, perhiasan, dan pengecoran seni pada zaman dahulu. Saat ini aplikasi *investment casting* sudah sangat berkembang salah satunya pembuatan *blade turbine* dan komponen mesin lainnya. Prinsip dari *investment casting* ini adalah membentuk lilin sebagai inti cetakan dengan *injection molding*. Hasil lilin yang telah dibentuk dilapisi cairan keramik dan didinginkan proses ini sudah terbentuk cetakan *investment casting*. Setelah didinginkan cetakan dipanaskan hingga lilin meleleh dan hanya tersisa cetakan keramik (Prasetiyo and Karyadi, 2021).

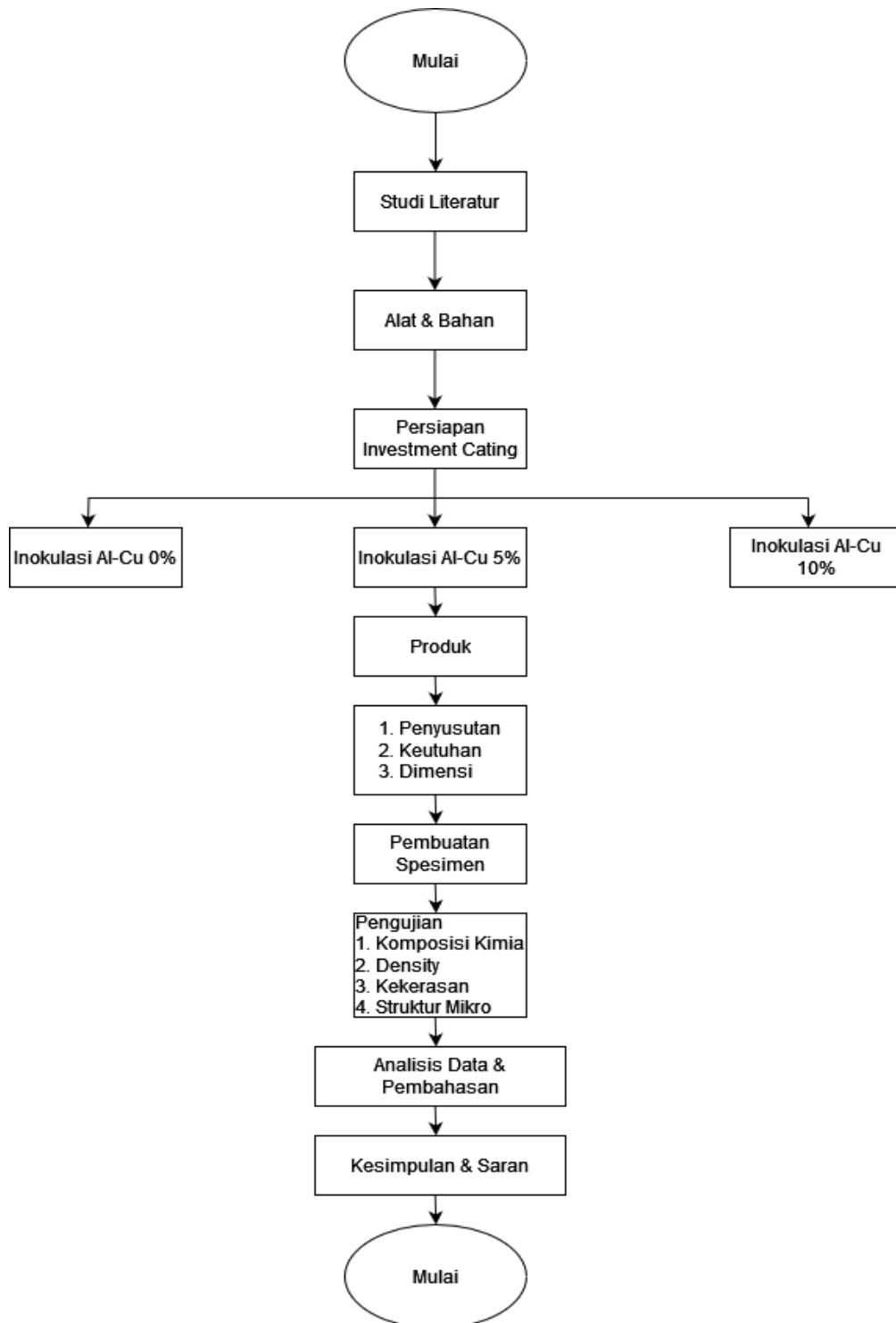
Tembaga (Cu) adalah unsur logam transisi berwarna coklat kemerahan yang merupakan konduktor panas dan listrik yang sangat baik. Tembaga masih dijumpai di alam dalam bentuk bebas maupun sebagai senyawa dan masih berupa biji tembaga seperti (CuFeS₂), cuprite (Cu₂O), chalcocite (Cu₂S) dan malachite (Cu₂OH₂CO₃). Melalui pengerasan atau pelapisan presipitasi, sifat mekanik dari paduan ini dapat menyamai baja ringan, seperti kuat, mudah dikerjakan (*machinability*) karena memiliki

sifat mekanik dan kemampuan mesin yang baik. Paduan aluminium dan tembaga biasanya digunakan dalam konstruksi paku keling dan telah banyak digunakan dalam konstruksi pesawat terbang, seperti duralumin. (Susila, Supriyanto and Hermawan, 2022) Dengan unsur tembaga pada aluminium akan meningkatkan kekerasannya dan kekuatannya karena tembaga bisa memperhalus struktur butir dan akan mempunyai kualitas pengerjaan mesin yang baik, mampu tempa, keuletan yang baik dan mudah dibentuk (Media Nofri, 2019).

Data yang diperoleh akan dianalisis untuk menganalisis pengaruh variasi penambahan unsur Tembaga (Cu) terhadap penyusutan, densitas, kekerasan, struktur mikro, dan komposisi kimia korosi pada Aluminium. Informasi ini akan memberikan wawasan yang berharga bagi industri dalam memahami sifat fisik Aluminium ketika ditambah unsur Tembaga pada proses *investment casting*. Dalam penelitian yang berjudul “Studi Variasi Penambahan Unsur Tembaga (Cu) Terhadap Penyusutan, Komposisi Kimia, *Density*, Kekerasan, Dan Struktur Mikro Pada Pengecoran Logam Aluminium Dalam Proses *Investment Casting*” ini, kami menjelaskan metode *investment casting* yang digunakan, hasil penambahan unsur Tembaga (Cu) pada Aluminium. Tujuannya yaitu memberikan pemahaman tentang pengaruh penambahan unsur Tembaga (Cu) pada Aluminium terhadap penyusutan, *density*, kekerasan, struktur mikro dan komposisi kimia.

2. METODE

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Suarakarta untuk proses pengecoran dan pengujian struktur mikro, penyusutan dan *density*; Laboratorium Teknik Mesin Universitas Sebelas Maret (UNS) untuk pengujian kekerasan dan Politeknik Manufaktur Ceper untuk pengujian komposisi kimia. Penelitian dimulai dengan melakukan studi literatur baik jurnal maupun buku dan diakhiri dengan melakukan penarikan kesimpulan dari penelitian yang dilakukan dan pembuatan saran penelitian. Berikut merupakan diagram alir penelitian yang dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.1 Prosedur Penelitian

2.1.1 Proses *Investment Casting* dan Penambahan Paduan Al-Cu

1. Menyiapkan lilin yang akan digunakan untuk membuat pola lilin.
2. Menyiapkan tungku kowi, gas yang telah dipasang regulator untuk melelehkan

lilin dan Aluminium.

3. Membuat pohon lilin yang terbuat dari lilin yang dicairkan.
4. Menuangkan lilin cair ke dalam *mold* (cetakan).
5. Mendinginkan lilin yang sudah terbentuk.
6. Melapisi lilin dengan lapisan *ceramic slurry* berupa campuran *gypsum* dan bubuk alumina yang sudah dicampur air.
7. Menghilangkan lilin yang sudah dilapisi *ceramic slurry* dengan cara dipanaskan pada mesin *furnance*.
8. Menambahkan bubuk tembaga ke dalam cetakan gypsum yang sudah jadi.
9. Melelehkan Aluminium dengan tungku kowi hingga aluminium menjadi cair.
10. Menuangkan Aluminium panas ke dalam cetakan gypsum yang sudah ditambahkan bubuk tembaga setelah itu didinginkan.
11. Menghancurkan cetakan gypsum.
12. Menghaluskan Aluminium dengan gerinda.
13. Produk jadi dan siap dilakukan penelitian.

2.1.2 Pengujian Penyusutan

1. Menyiapkan produk yang akan disajikan
2. Mengukur volume benda asli.
3. Mengukur benda produk.

2.1.3 Pengujian Komposisi Kimia

1. Menyiapkan sampel hingga bersih dan permukaan kering.
2. Memastikan sampel tidak tersentuh setelah persiapan sampel.
3. Memastikan sampel tidak saling tumpang tindih.
4. Membuka katup utama tabung kemudian buka katup regulator.
5. Mengatur tekanan argon untuk 3 bar lalu pastikan tekanan tabung harus lebih dari 5 bar apabila kurang dari 5 bar ganti tabung tersebut.
6. Membuka cover stand lalu lepaskan penutup selang warna merah.
7. Menghidupkan *UPS/stabilizer*.
8. Menghidupkan *main switch*.
9. Menyalakan computer tunggu sampai tampilan windows 10 muncul, lalu klik dua kali pada ikon *Elementas Suite ES Analysis*.
10. Melakukan purging yaitu membiarkan alat tersebut hidup dengan gas argon

mengalir selama kurang lebih 1 jam.

11. Mengklik ikon *activated method*, lalu pilih *base* dan *methods* yang akan digunakan.
12. Menempatkan sampel pada *table* tempat spark dan pastikan lubang *spark* sepenuhnya tertutup.
13. Memutar clamp sample lalu turunkan diatas sample yang akan dianalisa.
14. Memeriksa tampilan posisi *sample* di *monitor waiting for start* yang berarti terhubung dan siap untuk dilakukan analisa.
15. Mengklik *workflow* menu lalu klik *maintenance*.
16. Menempatkan sample RE 12 yang telah digerinda pada table analisa, lalu klik start atau keyboard F2 atau tombol on didepan alat.
17. Mengecek indicator sampai menunjukkan warna hijau lalu klik *complete* jika berwarna bisa lakukan *measure again* atau dilakukan *purging* lagi, jika masih merah sample harus digerinda lagi.
18. Melakukan verifikasi data dengan tes *control sample spark* minimal 2 kali dengan menempatkan sample dengan posisi berubah-ubah.
19. Mengklik ikon *report analysis* untuk mencetak ke printer langsung dan simpan hasil dengan format pdf.
20. Mengklik *complete analysis* atau *reject analysis* untuk menghapus tampilan hasil analisa tersebut.

2.1.4 Pengujian *Density*

1. Menyiapkan produk yang akan diuji.
2. Mengukur massa produk cor.
3. Mengukur volume produk cor.
4. Mengukur nilai *density*.

2.1.5 Pengujian Kekerasan

1. Menyiapkan benda kerja yang sudah rata kedua permukaannya dan sudah dipoles dengan autosol.
2. Menghidupkan alat uji vickers dan monitor.
3. Menerangkan lampu pada pengaturan di kontrol panel.
4. Mengatur skala beban sesuai yang diinginkan.
5. Memasang benda kerja pada landasan.

6. Spesimen di naik turun dengan memutar handle hingga terlihat struktur mikronya.
7. Menekan tombol start dan tunggu hingga 30 detik.
8. Mengukur diameter 1 dan diameter 2 lalu catat nilai HV nya.

2.1.6 Pengujian Struktur Mikro

1. Menyiapkan perlengkapan pengujian.
2. Masuk ke aplikasi Dimas Elite.
3. Menghidupkan mesin uji struktur mikro
4. Meletakkan spesimen pada meja kerja
5. Mengatur posisi meja kerja
6. Mengatur converter sesuai pembesaran yang diinginkan
7. Memfokuskan gambar struktur mikro menggunakan tuas pengatur fokus.
8. Apabila gambar sudah fokus, klik snap pada layar monitor untuk pengambilan gambar struktur mikro.
9. Menyimpan gambar sesuai file yang diinginkan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil dan Analisa Pengamatan Produk Cor

Pengamatan ini dilakukan untuk menilai bentuk produk coran sesuai dengan cetakan desain pola yang telah dibuat. Pohon pola diberikan lapisan dari *ceramic slurry*, yang terbuat dari campuran *gypsum* dan serbuk alumina yang dicampur dengan air, serta proses pembekuan aluminium, sangat mempengaruhi hasil akhir produk. Jika cetakan dibuat dengan baik dan proses pembekuan bisa dilakukan secara maksimal, produk coran yang dihasilkan akan memenuhi spesifikasi yang diinginkan. Sebaliknya, produk yang tidak sesuai spesifikasi akan dikembalikan ke tungku untuk dilebur ulang. Berikut Gambar 2. Hasil Produk Cor an.



Gambar 2. Hasil Produk Cor an

3.1.1 Pembahasan Hasil Pengamatan Produk Cor

Hasil pengamatan dari proses pengecoran dengan metode *investment casting* menunjukkan bahwa metode ini sangat efektif untuk menghasilkan produk dengan kualitas tinggi dan toleransi dimensi yang ketat. Meskipun terdapat beberapa pori kecil juga cacat coran kualitas keseluruhan tetap memuaskan dan sesuai dengan standar industri. Maka dari itu, terus memantau dan mengoptimalkan parameter proses agar kualitas coran tetap terjaga agar dapat digunakan secara maksimal.

3.2 Hasil dan Analisa Pengujian Penyusutan

Pengujian penyusutan untuk mengetahui tingkat penyusutan yang terjadi pada material coran serta faktor-faktor yang mempengaruhinya. Pengujian penyusutan dilakukan dengan menggunakan metode pengukuran langsung pada spesimen coran. Spesimen yang telah dicetak kemudian didinginkan dan diukur dimensinya untuk mengetahui perubahan ukuran yang telah terjadi.

Berikut perhitungan pemuaian panjang terhadap penyusutan:

$$L_t = L_o (1 - \alpha \cdot \Delta T) \quad (1)$$

$$L_t = L_o - \alpha \cdot L_o \cdot \Delta T$$

$$L_t - L_o = -\alpha \cdot L_o \cdot \Delta T$$

$$\Delta L = L_o \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (2)$$

Dimana:

L_t = Panjang Akhir (mm)

L_o = Panjang Mula Mula (mm)

ΔL = Perubahan Panjang (mm)

α = Koefisien Muai Panjang ($^{\circ}\text{C}$)

$$= 0,000024/^{\circ}\text{C}$$

ΔT = Perubahan Suhu ($^{\circ}\text{C}$)

Berikut perhitungan pemuaian luas terhadap penyusutan:

$$A_t = A_o (1 - \beta \cdot \Delta T) \quad (3)$$

$$A_t = A_o - \beta \cdot A_o \cdot \Delta T$$

$$A_t - A_o = -\beta \cdot A_o \cdot \Delta T$$

$$\Delta A = A_o \cdot \beta \cdot \Delta T \quad (4)$$

Dimana:

A_t = Luas Akhir (mm^2)

A_o = Luas Mula Mula (mm^2)

ΔA = Perubahan luas (mm^2)

β = Koefisien Muai Luas ($/^{\circ}\text{C}$)
 $= 2 \times 0,000024/^{\circ}\text{C}$

ΔT = Perubahan Suhu ($^{\circ}\text{C}$)

Berikut perhitungan pemuaian volume terhadap penyusutan

$$V_t = V_o (1 - \gamma \cdot \Delta T) \quad (5)$$

$$V_t = V_o - \gamma \cdot L_o \cdot \Delta T$$

$$V_t - V_o = - \gamma \cdot L_o \cdot \Delta T$$

$$\Delta V = V_o \cdot \gamma \cdot \Delta T \quad (6)$$

Dimana:

V = Volume Akhir (mm^3)

V_o = Volume Mula Mula (mm^3)

ΔV = Perubahan Volume (mm^3)

γ = Koefisien Muai Volume ($/^{\circ}\text{C}$)
 $= 3 \times 0,000024/^{\circ}\text{C}$

ΔT = Perubahan Suhu ($^{\circ}\text{C}$)

Berikut rumus pengujian penyusutan

$$S = \frac{(V_{\text{Pola}} - V_{\text{Produk}})}{V_{\text{Pola}}} \times 100\% \quad (7)$$

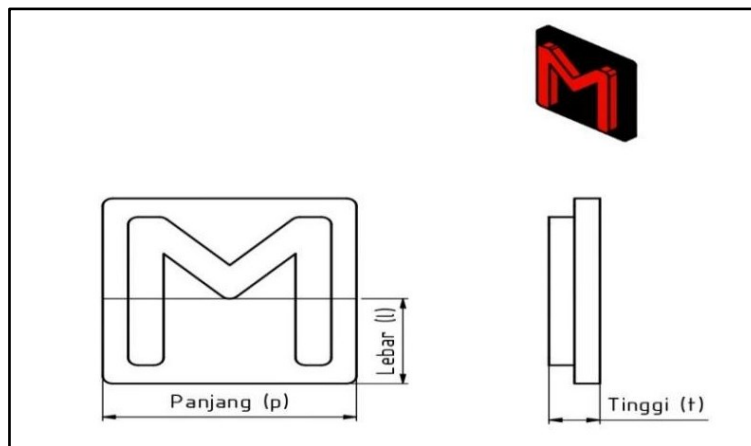
Dimana:

S = Persentase Penyusutan (%)

V_{pola} = Volume Pola Lilin (mm)

V_{Produk} = Volume Produk (mm)

Berikut Gambar 3. Sampel Pengujian Penyusutan



Gambar 3. Sampel Pengujian Penyusutan

Berikut Tabel 1. Hasil Pengujian Penyusutan

Tabel 1. Hasil Pengujian Penyusutan

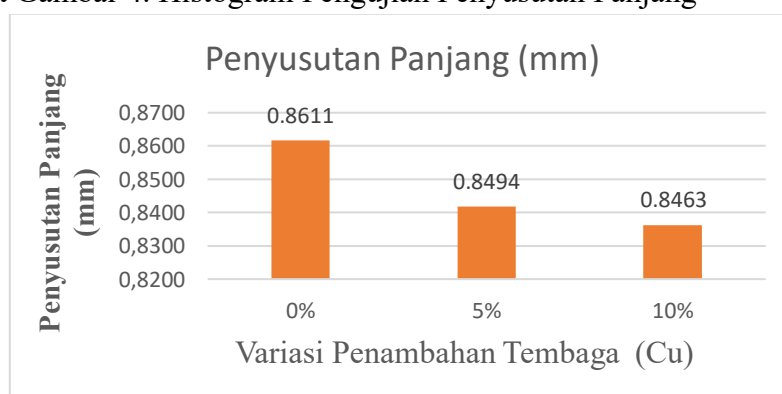
Variasi Penambahan Tembaga (Cu)	Dimensi Pola			Dimensi Produk			Penyusutan Panjang (mm)	Penyusutan Luas (mm ²)	Penyusutan Volume (mm ³)
	Panjang	Lebar	Tinggi	Panjang	Lebar	Tinggi			
0%	49.97	22.90	11.55	49.24	22.87	11.38	0.8611	39.4376	683.2565
5%	49.29	22.78	11.77	49.15	22.60	11.65	0.8494	38.6971	683.1970
10%	49.11	22.12	11.55	49.05	22.71	11.40	0.8463	37.4387	663.7881

Berikut Tabel 2. Hasil Pengujian Presentase Penyusutan

Tabel 2. Hasil Pengujian Presentase Penyusutan

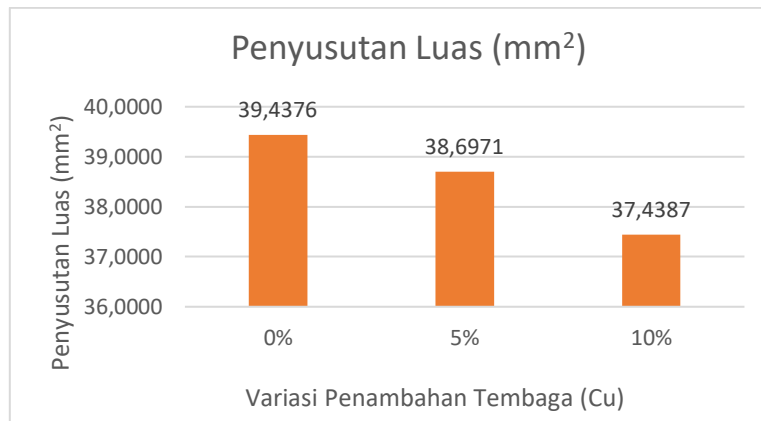
Variasi Penambahan Tembaga (Cu)	Dimensi Pola			Dimensi Produk			Volume Pola (Lilin) (mm ³)	Volume Benda Produk (mm ³)	Persentase Penyusutan (%)
	Panjang	Lebar	Tinggi	Panjang	Lebar	Tinggi			
0%	49.97	22.90	11.55	49.24	22.87	11.38	13216.82	12815.23194	3.04
5%	49.29	22.78	11.77	49.15	22.60	11.65	13226.89	12940.70	2.08
10%	49.11	22.12	11.55	49.05	22.71	11.40	12546.92	12396.80	1.20

Berikut Gambar 4. Histogram Pengujian Penyusutan Panjang



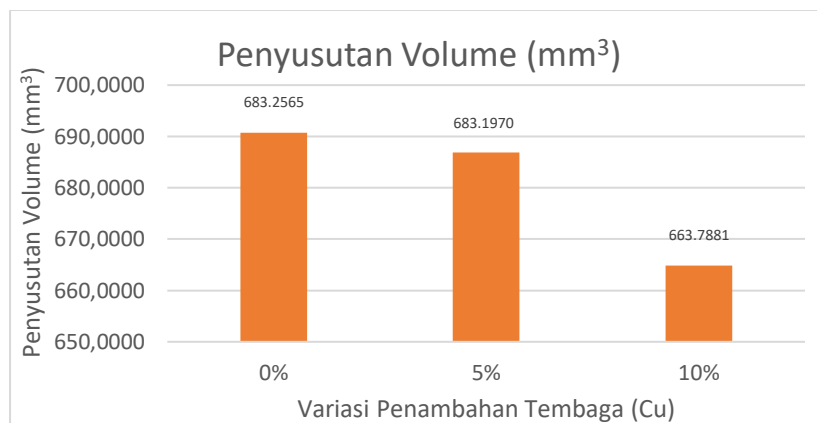
Gambar 4. Histogram Pengujian Penyusutan Panjang

Berikut Gambar 5. Histogram Pengujian Penyusutan Luas



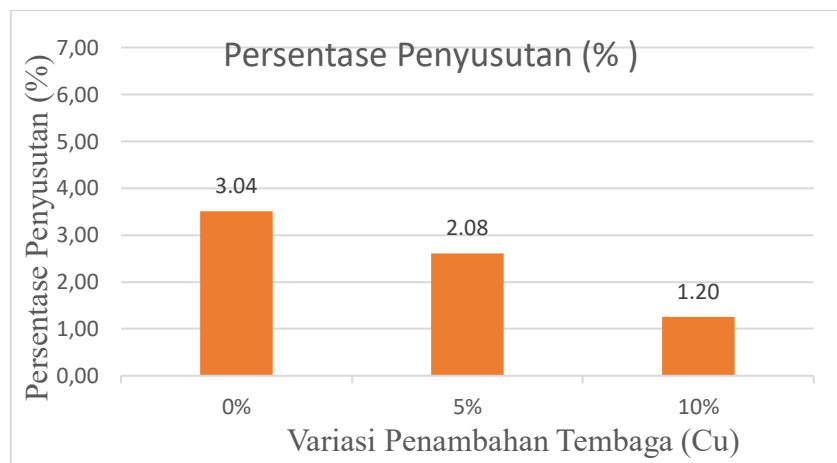
Gambar 5. Histogram Pengujian Penyusutan Luas

Berikut Gambar 6. Histogram Pengujian Penyusutan Volume



Gambar 6. Histogram Pengujian Penyusutan Volume

Berikut Gambar 7. Histogram Presentase Penyusutan



Gambar 7. Histogram Presentase Penyusutan

3.2.1 Pembahasan Hasil Pengujian Penyusutan

Pada hasil pengujian penyusutan terdapat hasil nilai pada penyusutan panjang pada spesimen 1 variasi 0% sebesar 0.8611 mm, pada spesimen 2 variasi 5% sebesar 0.8494 mm, pada spesimen 3 variasi 10% sebesar 0.8463 mm. Pada penyusutan luas pada spesimen 1 variasi 0% sebesar 39.4376 mm², pada spesimen 2 variasi 5% sebesar 38.6971 mm², pada spesimen 3 variasi 10% sebesar 37.4387 mm². Pada penyusutan volume pada spesimen 1 variasi 0% sebesar 683.2565 mm³ pada spesimen 2 variasi 5% sebesar 683.1970 mm³, pada spesimen 3 variasi 10% sebesar 663.7881 mm³. Pada persentase penyusutan nilai pada spesimen 1 variasi 0% sebesar 3.04%, pada spesimen 2 variasi 5% sebesar 2.16%, pada spesimen 3 variasi 10% sebesar 1.20%. Dilihat dari hasil pengujian penyusutan panjang, luas, volume, dan persentase penyusutan mengalami penurunan hal ini menunjukkan bahwa penambahan serbuk tembaga (Cu) dapat mengurangi penyusutan pada aluminium selama proses pendinginan karena tembaga dapat membantu dalam mengurangi porositas dan meningkatkan kepadatan hasil coran.

3.3 Hasil dan Analisa Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia ini bertujuan untuk mengetahui komposisi unsur-unsur kimia yang terkandung dalam produk cor. Variasi pencampuran Aluminium dengan serbuk tembaga sebesar 0%, 5%, dan 10%. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Politeknik Manufaktur Ceper menggunakan alat Uji Spektrometer dengan standar ASTM E 415-08. Komposisi kimia diuji sebelum dan setelah penambahan Tembaga (Cu) sebanyak 0%, 5%, dan 10% pada bahan Aluminium sebesar 180 gram, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Uji Komposisi Kimia

No	Unsur	Penambahan Serbuk Tembaga 0%	Penambahan Serbuk Tembaga 5%	Penambahan Serbuk Tembaga 10%
1	Si	0,735	0,764	0,764
2	Fe	0,755	2,368	2,331
3	<u>Cu</u>	<u>0,287</u>	<u>0,833</u>	<u>0,756</u>
4	Mn	0,028	0,090	0,070
5	Mg	0,777	0,707	0,609
6	Cr	0,079	0,163	0,114
7	Ni	0,0068	0,010	0,011
8	Zn	0,063	0,071	0,071
9	Ti	0,039	0,019	0,019
10	Pb	<0,0050	<0,0050	<0,0050

No	Unsur	Penambahan Serbuk Tembaga 0%	Penambahan Serbuk Tembaga 5%	Penambahan Serbuk Tembaga 10%
11	Sn	<0,0050	<0,0050	<0,0050
12	V	0,0047	0,0054	0,0055
13	Sr	0,0024	<0,0020	<0,0020
14	Zr	<0,0020	<0,0020	<0,0020
15	Cd	<0,0050	<0,0050	<0,0050
16	Co	<0,0030	<0,0030	<0,0030
17	B	0,0028	0,0054	0,0077
18	Ag	<0,0010	<0,0010	<0,0010
19	Bi	<0,0060	0,0062	<0,0060
20	Ca	0,0060	0,0020	0,0027
21	Li	<0,300	<0,300	<0,300
22	Al	97,18	94,95	95,23

3.3.1 Pembahasan Hasil Pengujian Komposisi Kimia

Pada hasil pengujian komposisi kimia terdapat 22 unsur yang terkandung pada Aluminium dengan penambahan serbuk tembaga.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa spesimen 1 dengan penambahan serbuk tembaga 0% mengandung komposisi unsur tembaga (Cu) sebesar 0,287, pada spesimen 2 dengan penambahan serbuk tembaga 5% mengandung komposisi unsur tembaga (Cu) sebesar 0,833, pada spesimen 3 dengan penambahan serbuk tembaga 10% mengandung komposisi unsur tembaga (Cu) sebesar 0,756. Pada penambahan serbuk tembaga (Cu) masih belum terlihat hasil yang maksimal dikarenakan pada saat proses pengadukan masih kurang tercampur ratanya serbuk tembaga (Cu) didalam kowi sehingga pencampuran serbuk tembaga (Cu) kurang maksimal.

3.4 Hasil dan Analisa Pengujian *Density*

Dalam perhitungan *density* dilakukan dengan cara mengukur volume spesimen menggunakan gelas ukur dan menimbang berat spesimen menggunakan timbangan digital untuk mengetahui massa dari spesimen. Lalu dihitung dengan menggunakan rumus:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (8)$$

Dimana:

$$\rho = \text{Density} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)$$

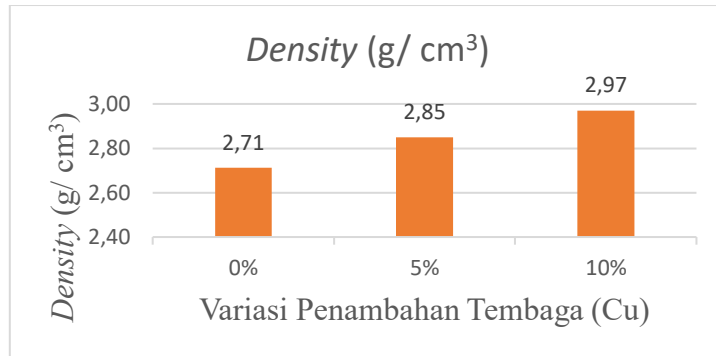
m = Massa (g)

V = Volume (mm³)

Berikut Tabel 4. Hasil Pengujian *Density*

Variasi	Massa (g)	Volume (cm ³)	<i>Density</i> (g/cm ³)
Variasi Penambahan Cu 0%	2,17	0,8	2,71
Variasi Penambahan Cu 5%	2,85	1	2,85
Variasi Penambahan Cu 10%	2,97	1	2,97

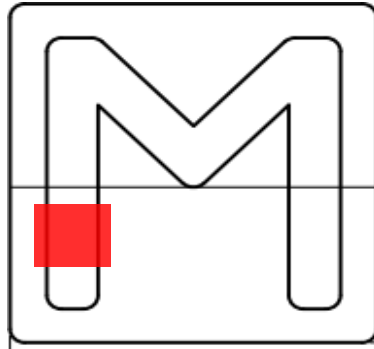
Berikut Gambar 8. Histogram Pengujian *Density*



Gambar 8. Histogram Pengujian *Density*

3.4.1 Pembahasan Hasil Pengujian *Density*

Berikut Gambar 9. Specimen Pengujian *Density*



Gambar 9. Specimen Pengujian *Density*

Pada hasil pengujian *density* terdapat hasil nilai pada spesimen 1 variasi penambahan serbuk tembaga (Cu) 0% sebesar 2,71 g/cm³, pada spesimen 2 variasi penambahan serbuk tembaga (Cu) 5% sebesar 2,85 g/cm³, variasi penambahan serbuk tembaga (Cu) 10% sebesar 2,97 g/cm³. Berdasarkan data diatas, penambahan serbuk tembaga (Cu) semakin banyak dapat meningkatkan *density* dari spesimen. Hasil diatas menunjukkan bahwa dari spesimen 1, spesimen 2, dan spesimen 3 pada variasi 0% mendapatkan hasil 2,70 g/cm³ sehingga dapat disimpulkan bahwa variasi 0% memiliki porositas yang lebih tinggi sedangkan pada

variasi 10% mendapatkan hasil 2,90 g/cm³ sehingga dapat disimpulkan bahwa porositas yang dihasilkan lebih rendah.

3.5 Hasil dan Analisa Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan ini menggunakan metode Vickers dengan tujuan untuk mengetahui nilai kekerasan pada setiap titik yang diuji pada spesimen hasil proses pengecoran. Variasi penambahan serbuk tembaga sebesar 0%, 3%, dan 5% terhadap Aluminium. Metode ini mengikuti standar ASTM E384 dan melibatkan penerapan tekanan pada permukaan material yang siap diuji dengan beban 100 gf. Untuk pengujian kekerasan ini titik yang diuji yaitu ada 3 titik.

Persamaan untuk menghitung harga kekerasan Vickers:

$$HV = 1,854 \frac{F}{d^2} \quad (9)$$

Dimana:

F = Beban yang diberikan (kg)

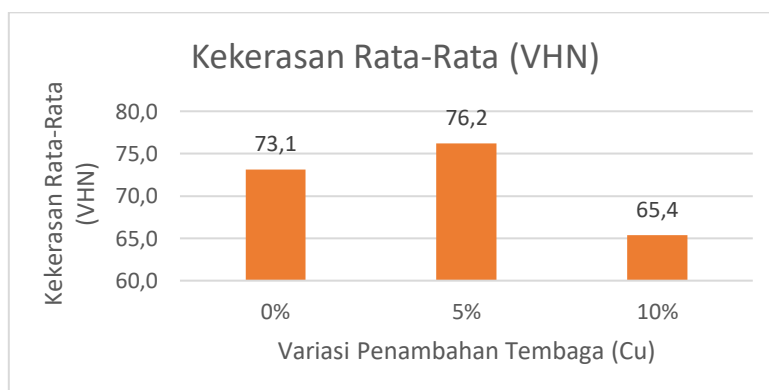
d = Diagonal rata-rata bekas injakan

Berikut Tabel 5. Hasil Pengujian Kekerasan *Vickers*.

Tabel 5. Hasil Pengujian Kekerasan *Vickers*

Variasi Spesimen	Titik Uji	d1	d2	Kekerasan (VHN)	Kekerasan Rata-Rata (VHN)
0%	Titik Uji 1	50.99	50.76	71.7	73,1
	Titik Uji 2	51.31	49.26	73.3	
	Titik Uji 3	49.56	50.23	74.4	
5%	Titik Uji 1	50.1	50.23	73.6	76,2
	Titik Uji 2	49	48.81	77.5	
	Titik Uji 3	48.87	49.06	77.5	
10%	Titik Uji 1	55.05	54.3	61.3	65,4
	Titik Uji 2	52.18	52.03	68.3	
	Titik Uji 3	53.41	52.11	66.6	

Berikut Gambar 10. Histogram Hasil Pengujian Kekerasan



Gambar 10. Histogram Hasil Pengujian Kekerasan Vickers

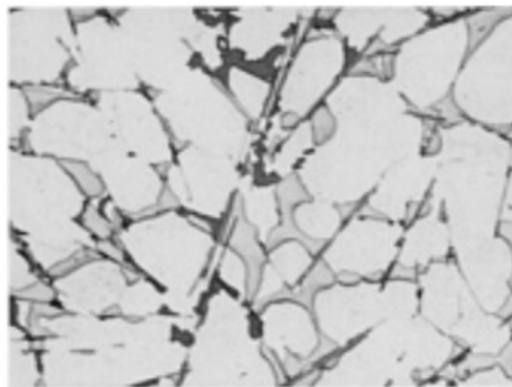
3.5.1 Pembahasan Hasil Pengujian Kekerasan

Pada hasil pengujian kekerasan terdapat hasil nilai kekerasan rata-rata pada spesimen 1 variasi penambahan serbuk tembaga (Cu) 0% sebesar 73.1 VHN, pada spesimen 2 variasi penambahan serbuk tembaga (Cu) 5% sebesar 76.2 VHN, variasi penambahan serbuk tembaga (Cu) 10% sebesar 65.4 VHN. Berdasarkan data diatas, penambahan serbuk tembaga (Cu) semakin banyak dapat meningkatkan kekerasan dari spesimen. Akan tetapi, hasil pada variasi 10% semakin menurun dikarenakan pada saat proses pengadukan masih kurang tercampur rataanya serbuk tembaga (Cu) didalam kowi sehingga pencampuran serbuk tembaga (Cu) kurang maksimal.

3.6 Hasil dan Analisa Pengujian Struktur Mikro

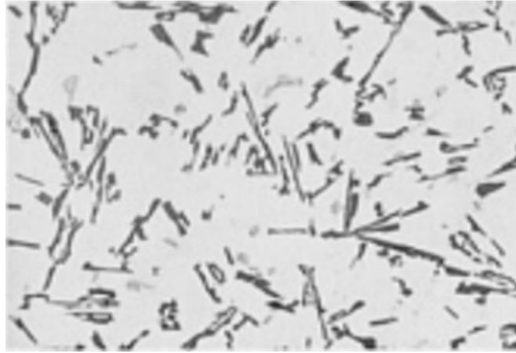
Analisis struktur mikro sangat penting untuk memahami sifat mekanik dan kinerja material. Tanpa proses etsa pengamatan struktur mikro dapat dilakukan dengan mikroskop optik. Mikroskop ini memungkinkan pengamatan permukaan material secara langsung. Hal yang biasa dianalisis dengan tanpa etsa yaitu evaluasi cacat permukaan, pengukuran ukuran butir, dan analisis fasa. Pada pengujian ini pembesaran yang digunakan yaitu 200x dengan variasi 0%, variasi, 5%, dan variasi 10%.

Berdasarkan acuan dari *ASM Handbook Vol.9* pada gambar dibawah:



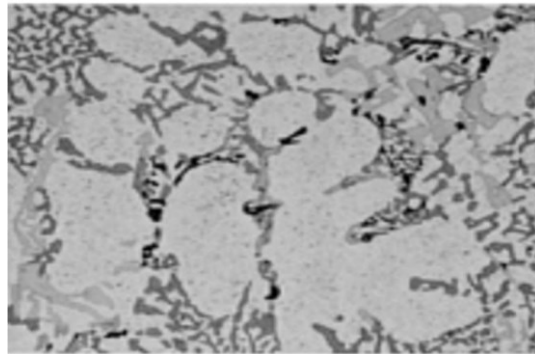
Gambar 11. Struktur Mikro Panduan Aluminium Jaringan Interdendritik CuAl_2 Bulat
(ASM Handbook Vol 9, 1992)

Strukturnya terdiri dari jaringan interdendritik CuAl_2 bulat (abu-abu muda) yang mengandung bilah Cu_2FeAl_7 (abu-abu sedang), dan beberapa partikel silikon (abu-abu tua).



Gambar 12. Struktur Mikro Panduan Alumunium Jaringan Partikel Silikon (ASM Handbook Vol 9, 1992)

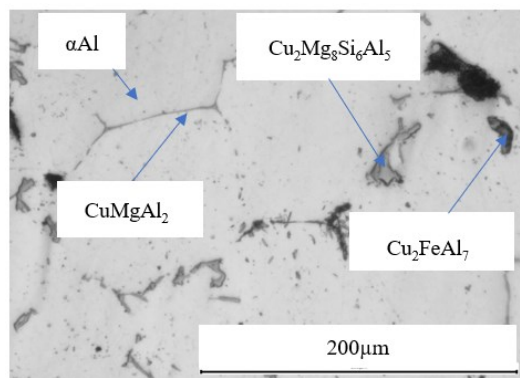
Struktur terdiri dari jaringan partikel silikon (abu-abu tua, bersudut) dalam eutektik aluminium-silikon interdendritik yang terpisah dan partikel fase $\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6\text{Al}_5$ (abu-abu muda, seperti aksara)



Gambar 13. Struktur Mikro Paduan Alumunium Jaringan Interdendritik Silikon Eutektik (ASM Handbook Vol 9, 1992)

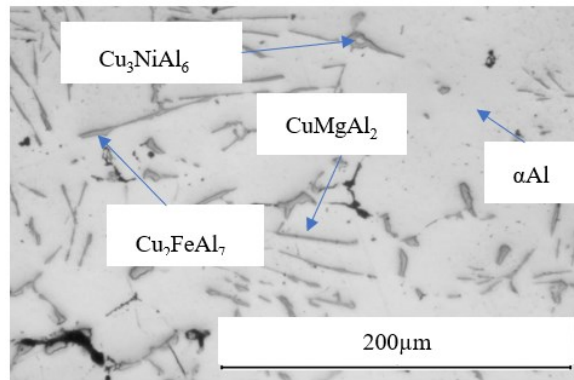
Struktur terdiri dari Jaringan interdendritik silikon eutektik (aksara abu-abu sedang), Mg_2Si (aksara hitam), Cu_3NiAl_6 (aksara abu-abu terang), dan NiAl_3 (partikel abu-abu gelap)

Berikut gambar 14. Foto Hasil Struktur Mikro Variasi Penambahan Serbuk Tembaga 0%.



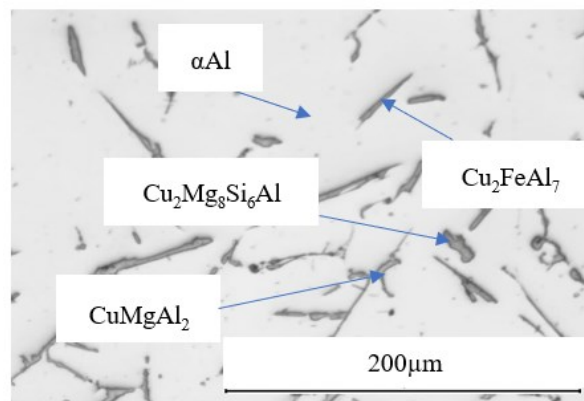
Gambar 14. Foto Hasil Struktur Mikro Variasi Penambahan Serbuk Tembaga 0%.

Berikut gambar 15. Foto Hasil Struktur Mikro Variasi Penambahan Serbuk Tembaga 5%



Gambar 15. Foto Hasil Struktur Mikro Variasi Penambahan Serbuk Tembaga 5%

Berikut gambar 16. Foto Hasil Struktur Mikro Variasi Penambahan Serbuk Tembaga 10%



Gambar 16. Foto Hasil Struktur Mikro Variasi Penambahan Serbuk Tembaga 10%

3.6.1 Pembahasan Hasil Pengujian Struktur Mikro

Berdasarkan hasil pengujian struktur mikro menunjukkan bahwa ada perbedaan struktur yang terjadi pada setiap hasil cor masing – masing variasi. Menggunakan acuan dari ASM H andbook Vol. 9 dapat disimpulkan bahwa pada tiap variasi memiliki unsur yang saling mengikat seperti Cu-Mg-Al yang terdiri jaringan berbentuk bintik – bintik yang menyebar merata, CuMgAl_2 yang berbentuk seperti percabangan pohon yang terarah dengan warna abu abu. Cu_2FeAl_7 yang berbentuk bilah memanjang dengan warna abu – abu sedang. $\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6\text{Al}_5$ yang berbentuk seperti skrip/aksara yang berwarna abu-abu muda. Cu_3NiAl_6 yang berbentuk seperti aksara dan berwarna abu – abu terang. Al berwarna abu abu paling terang dan paling banyak.

4. PENUTUP

4.1 Kesimpulan

Dari hasil pengujian penelitian dan analisa yang telah dilakukan, terdapat kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil pengujian penyusutan terdapat hasil nilai pada penyusutan panjang pada spesimen 1 variasi 0% sebesar 0.8611 mm, pada spesimen 2 variasi 5% sebesar 0.8494 mm, pada spesimen 3 variasi 10% sebesar 0.8463 mm. Pada penyusutan luas pada spesimen 1 variasi 0% sebesar 39.4376 mm², pada spesimen 2 variasi 5% sebesar 38.6971 mm², pada spesimen 3 variasi 10% sebesar 37.4387 mm². Pada penyusutan volume pada spesimen 1 variasi 0% sebesar 683.2565 mm³ pada spesimen 2 variasi 5% sebesar 680.1019 mm³, pada spesimen 3 variasi 10% sebesar 679.7142 mm³. Pada persentase penyusutan nilai pada spesimen 1 variasi 0% sebesar 3.04%, pada spesimen 2 variasi 5% sebesar 2.16%, pada spesimen 3 variasi 10% sebesar 1.20%. pengujian penyusutan pada persentase penyusutan terdapat hasil nilai pada spesimen 1 variasi 0% sebesar 3.04%, pada spesimen 2 variasi 5% sebesar 2.08%, pada spesimen 3 variasi 10% sebesar 1.20%. Dilihat dari hasil pengujian penyusutan panjang, luas, volume, dan persentase penyusutan mengalami penurunan hal ini menunjukkan bahwa penambahan serbuk tembaga (Cu) dapat mengurangi penyusutan pada alumunium selama proses pendinginan karena tembaga dapat membantu dalam mengurangi porositas dan meningkatkan kepadatan hasil cor an.
2. Hasil Pengujian Komposisi Kimia pada spesimen 1 variasi 0% mengandung serbuk tembaga (Cu) sebesar 0,287%, pada spesimen 2 variasi 5% penambahan serbuk tembaga (Cu) sebesar 0,833%, pada spesimen 3 variasi 10% penambahan serbuk tembaga (Cu) sebesar 0,756%. Dapat disimpulkan bahwa pada variasi 10% tembaga (Cu) mengalami penurunan dikarenakan pada saat proses pengadukan masih kurang tercampur ratanya serbuk tembaga (Cu) didalam kowi sehingga pencampuran serbuk tembaga (Cu) kurang maksimal.
3. Hasil pengujian *density* pada spesimen 1 variasi 0% mendapatkan hasil 2,71 g/cm³, pada spesimen 2 variasi 5% penambahan serbuk tembaga (Cu) mendapatkan hasil 2,85 g/cm³, pada spesimen 2 variasi 5% penambahan serbuk tembaga (Cu) mendapatkan hasil 2,97 g/cm³. Dapat disimpulkan bahwa penambahan serbuk tembaga (Cu) semakin banyak dapat meningkatkan *density* dari spesimen disebabkan massa tembaga

(Cu) lebih besar dari Aluminium sedangkan variasi 0% memiliki porositas yang lebih tinggi karena *density* yang dihasilkan semakin rendah.

4. Hasil pengujian kekerasan pada spesimen 1 variasi penambahan serbuk tembaga (Cu) 0% sebesar 7,31 VHN, pada spesimen 2 variasi penambahan serbuk tembaga (Cu) 5% sebesar 7,62 VHN, pada spesimen 3 variasi penambahan serbuk tembaga (Cu) 10% sebesar 6,54 VHN. Dapat disimpulkan bahwa penambahan serbuk tembaga (Cu) semakin banyak dapat meningkatkan kekerasan dari spesimen. Akan tetapi, hasil pada variasi 10% semakin menurun dikarenakan pada saat proses pengadukan masih kurang tercampur rataanya serbuk tembaga (Cu) didalam kowi sehingga pencampuran serbuk tembaga (Cu) kurang maksimal.
5. Hasil pengujian struktur mikro bahwa pada tiap variasi memiliki unsur yang saling mengikat seperti Cu-Mg-Al yang terdiri jaringan berbentuk bintik – bintik yang menyebar merata, CuMgAl_2 yang berbentuk seperti percabangan pohon yang terarah dengan warna abu abu. Cu_2FeAl_7 yang berbentuk bilah memanjang dengan warna abu – abu sedang. $\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6\text{Al}_5$ yang berbentuk seperti skrip/aksara yang berwarna abu-abu muda. Cu_3NiAl_6 yang berbentuk seperti aksara dan berwarna abu – abu terang. Al berwarna abu abu paling terang dan paling banyak.

4.2 Saran

Setelah melakukan penelitian ini, beberapa saran diberikan, diantaranya sebagai berikut:

1. Sebelum melakukan proses pengecoran dengan metode *investment casting* sebaiknya mempersiapkan bahan dan alat yang akan digunakan serta memastikan desain produk yang akan dibuat agar mempermudah dan mempercepat pada saat proses pengecoran.
2. Lilin yang digunakan sebaiknya berjenis lilin tanpa pola. lilin runner, dan lilin mikrokristalin serta cetakan yang digunakan sebaiknya menggunakan cetakan terbuat dari besi.
3. Diperlukan penelitian lebih lanjut pada saat proses pembuatan *ceramic slurry* sebagai lapisan pada pola lilin agar mendapatkan hasil yang maksimal dan efisiensi waktu.
4. Untuk penelitian selanjutnya yang sejenis disarankan menggunakan variasi temperatur cetakan gypsum dan temperatur tuang.
5. Pada saat pengadukan serbuk tembaga sebaiknya kowi tidak diletakkan diatas tungku agar serbuk tidak cepat melebur.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, M.S. *Et Al.* (2023) 'Experimental Study On The Effects Of Three Alloying Elements On The Mechanical, Corrosion And Microstructural Properties Of Aluminum Alloys', *Results In Materials*, 20 (October), P. 100485. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2023.100485>.
- Alfiana, F., Mujiarto, S. And Widodo, S. (2019) 'Pengaruh Variasi Penambahan Tembaga Terhadap Nilai Kekerasan Dan Struktur Mikro Pada Remelting Piston', *Teknik Mesin Merc (Mechanical Engineering Research Collection)*, 2.
- Anderson, W., Rudianto, H. And Haryadi, D. (2018) 'Pengaruh Komposisi Cu Terhadap Sifat Mekanik Dan Stuktur Mikro Dari Pengecoran Al-Si', *Jurnal Ilmiah Teknologi Dan Rekayasa*, 23(2), Pp. 146–154.
- Apriliyanto, P. And Mahendra, A. (2014) 'Analisis Variabel Proses Produk Pengecoran Logam Menggunakan Cetakan Sand Casting', *Jurnal Teknik Mesin*, 02(02), Pp. 70–78.
- Astm International (2005) *Standard Test Methods For Rockwell Hardness And Rockwell Superficial Hardness Of Metallic Materials*, *Annual Book Of Astm Standards*. United States.
- ASM Handbook, Vol 9, 2004, *Metallography And Microstructure*, ASM Internasional
- Avner Sidney., H. (1974) *Introduction To Physical Metallurgy*, *Mcgraw Hill Book Company, Tokyo*. Tokyo.
- Bashoruddin, M. And Nasution, A.H. (2022) 'Pengaruh Kuat Arus Pada Kekuatan Tarik Aluminium 6061 Dengan Pengelasan Tungsten Inert Gas (Tig)', *Jurnal Piston*, 7(1), Pp. 20–28.
- Bayuseno, A.P. And Chamdani, N.A. (2011) 'Adc 12 Sebagai Material Sepatu Rem Menggunakan Pengecoran High Pressure Die Casting Dengan Variasi Temperatur Penuangan', *Jurnal Teknik Mesin*, 13(1), Pp. 17–23. Available At: <http://ejournal.undip.ac.id/index.php/rotasi%0aadc>.
- Bhirawa, W.T. (2013) 'Proses Pengecoran Logam Dengan Menggunakan Sand Casting', *Jurnal Teknik Industri*, 4(1), Pp. 31–41. Available At: <https://doi.org/10.35968/jtin.v4i1.826>.
- Callister Jr, W.D. And Rethwisch, D.G. (2003) *Characteristics, Application, And Processing Of Polymers, Materials Science And Engineering - An Introduction*.

- Deivandra *Et Al.* (2013) ‘Analisis Struktur Mikro Dan Sifat Mekanis Hasil Las Titik Dan Brazing Untuk Industri Rumahan’, *Jurnal Teknik Mesin S-I*, 1(2), Pp. 1–8.
- Fikri Fahrizal Manurung And Mahadi (2022) ‘Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Temperatur Pemanasan Awal Cetakan Horizontal Centrifugal Casting Pada Pengecoran Al-Si Terhadap Sifat Mekanik Dan Cacat Coran’, *Jurnal Dinamis*, 10(2), Pp. 46–52.
- Fox, R.W., Pritchard, P.J. And Mcdonald, A.T. (2011) *Introduction To Fluid Mechanics*. Wiley.
- Halliday, D., Resnick, R. And Walker, J. (2014) *Fundamentals Of Physics*. Wiley.
- Hardi Sudjana (2008) *Teknik Pengecoran*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Departemen Pendidikan Nasional.
- Helmenstine, Todd., Helmenstine, A. (2013) *Tabel Periodik*, *Science Notes*. Available At: <https://Sciencenotes.Org/Printable-Periodic-Table/>.
- Ikhsan, M., Sudarsono, S. And Endriatno, N. (2021) ‘Karakteristik Tegangan Dan Regangan Tarik Pada Komposit Cfrp Yang Berlubang’, *Enthalpy : Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik Mesin*, 6(3), P. 100. Available At: <https://doi.org/10.55679/Enthalpy.V6i3.20975>.
- Ja’far Baihaqi, M., Dika, J.W. And Mashudi, D. (2021) ‘Analisis Kekerasan Dan Cacat Porositas Terhadap Variasi Temperature Pada Al-Si Dengan Metode Lost Foam Casting Analysis Of Hardness And Porosity Defects On Temperature Variation On Al-Si With Lost Foam Casting Method’, *Jsnu : Journal Of Science Nusantara*, 1(2), Pp. 16–23.
- John Campbell (2011) *Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques And Design*, Elsevier Ltd. Waltham. Usa: Elsevier Ltd. Available At: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-01548-1>.
- Jonoadji, N., Kurniawan, A. And Siahaan, I.H. (2023) ‘Pemanfaatan Mesin Vacuum Casting Semi Otomatis Untuk Kebutuhan Pembuatan Produk Perhiasan’, *Jurnal Teknik Mesin*, 20(1), Pp. 24–30. Available At: <https://doi.org/10.9744/Jtm.20.1.24-30>.
- Joska, L. *Et Al.* (1992) *Asm Vol 9: Metallography And Microstructures*, *Asm Internasional*. Usa: Asm Internasional. Available At: <https://doi.org/10.1088/1748-6041/5/5/054108>.

- Khairunnisa, S. *Et Al.* (2023) ‘Kajian Spectrometer Menggunakan Sensor Cahaya Tcs3200’, *Gravitasi Jurnal Pendidikan Fisika Dan Sains*, 06(01), Pp. 13–19.
- Kumayasari, M.F. And Sultoni, A.I. (2017) ‘Studi Uji Kekerasan Rockwell Superficial Vs Micro Vickers’, *Jurnal Teknologi Proses Dan Inovasi Industri*, 2(2), Pp. 85–89.
- Kusuma, N.G. And Sidharta, I. (2014) ‘Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Dimensi Cil Dalam (Internal Chill) Terhadap Cacat Penyusutan (Shrinkage) Pada Pengecoran Aluminium 6061’, *Jurnal Teknik Pomits*, 3(2), Pp. 271–275.
- Laboratorium Teknik (1976) *Universitas Sebelas Maret, Laboratorium Material*. Available At: <https://ft.uns.ac.id/Laboratorium>.
- Laboratorium Teknik Mesin (2002) *Universitas Muhammadiyah Surakarta, Laboratorium Metalurgi*. Available At: <https://tm.ums.ac.id/Laboratorium-Metalurgi/>.
- Li, Z. *Et Al.* (2022) ‘Effect Of Slurry Thickness On The Quality Of Aluminized Coatings’, *Materials*, 15(19), Pp. 1–12. Available At: <https://doi.org/10.3390/ma15196758>.
- Majanasastra, R.B.S. (2016) ‘Analisis Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Hasil Proses Hydroforming Pada Material Tembaga (Cu) C84800 Dan Aluminium Al 6063’, *Jurnal Imiah Teknik Mesin*, 4(2), Pp. 15–30.
- Malisy, S. (2018) *Pengaruh Kecepatan Putaran Roll Terhadap Nilai Kekuatan Uji Tarik Dari Penggabungan 2 Pelat A1100 Dan A6061 Pada Proses Hot Roll Bonding*. Universitas Brawijaya.
- Media Nofri (2019) ‘Perbandingan Nilai Kekerasan Dan Struktur Mikro Material Piston Sepeda Motor 4 Tak Original Dan Imitasi’, *Bina Teknika*, 15(2), Pp. 115–125.
- Politeknik Manufaktur Ceper (2003) *Laboratorium Pengujian Logam Politeknik Manufaktur Ceper, Politeknik Manufaktur Web*. Available At: <https://polmanceper.ac.id/Pelayanan-Pengujian/>.
- Prasetyo, A.D. And Karyadi, E. (2021) ‘Pembuatan Prototipe Aluminium Cylinder Head Engine Dengan Metode Rapid Prototyping Dan Investment Casting’, *Jurnal Program Studi Teknik Mesin Um Metro*, 10(1), Pp. 142–151.
- Pustaka Pengetahuan (2024) *Tekanan Hidrostatik*. Available At: <https://www.pustakapengetahuan.com/>.
- Rawicaksana (2012) *Kegunaan Failure Mode And Effect Analysis*, *Blospot.Com*.

- Respati, S.M.B. (2008) 'Macam-Macam Mikroskop Dan Cara Penggunaan', *Momentum*, 4(2), Pp. 42–44.
- Reza Azizul Nasa A, H. (2013) 'Pengukuran Dimensi Komponen Artificial Hip Joint Hasil Investment Casting Menggunakan Material Aisi 316l', *Media Mesin: Majalah Teknik Mesin*, 22(1), Pp. 22–30.
- Rochman, R., Hariyati, P. And Purbo, C. (2024) 'Karaktetrisasi Sifat Mekanik Dan Pembentukan Fasa Presipitat Pada Aluminium Alloy 2024 – T 81 Akibat Perlakuan Penuaan', *Mekanika*, 8(2), Pp. 165–171.
- Rundman, K.B. (2000) *Metal Casting (Reference Book For My4130)*.
- Rusydi Zain, M. And Kurniawan Nasution, F.A. (2022) 'Pengaruh Penambahan Unsur Silikon (Si) Pada Aluminium (Al) Terhadap Kekuatan Impak Material Campuran Al-Si', *Buletin Utama Teknik*, 17(3), Pp. 253–256.
- Santika, D. *Et Al.* (2022) 'Uji Eksperimental Kekerasan Dan Struktur Mikro Pada Produk Foot Step Berbahan Limbah Alumunium Hasil Pengecoran Cetakan Pasir Silika Berpengikat Bentonit', *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur Dan Energi*, 5(1), Pp. 56–64.
- Saputra, F.R., Harjanto, B. And Sriwardani, N. (2020) 'Pengaruh Variasi Penambahan Kadar Air Dengan Bahan Pengikat Bentonit Terhadap Karakteristik Pasir Cetak Dan Cacat Porositas Hasil Pengecoran Logam Paduan Al-Si', *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin*, 02(4), Pp. 291–300.
- Sugeng, U.M. And Fato, A. (2020) 'Analisa Mekanis Baja Pada Bahan Spcc-Hd Dengan Proses Deep Drawing Dalam Pembuatan Drum', *Presisi*, 22(2), Pp. 75–81.
- Sulardjaka, A., Suprihanto, Y., Umardani, P., W. (2010) 'Analisis Cacat Cor Pada Proses Pengecoran Burner Kompor (Studi Kasus Di Pt. Suyuti Sido Maju, Ceper)', *Jurnal Teknik Mesin: Rotasi*, 12(4), Pp. 27–33.
- Supriyono (2017) *Material Teknik*. Surakarta: Muhammadiyah University Press.
- Surdia, T. And Kenji, C. (1996) *Teknik Pengecoran Logam*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Surdia, T. And Saito, S. (1999) *Pengetahuan Bahan Teknik*, Jakarta: Pt. Pradnya Paramita.
- Susila, R.C., Supriyanto, A. And Hermawan, M.V. (2022) 'Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Komposit Alumunium Tembaga (Al-Cu) Dengan Variasi Komposisi', *Jurnal Teknika*, 7(4), Pp. 228–235.

- Susilowati, S.E. And Permana, S. (2020) ‘Pengaruh Bentuk Sprue Well Pada Gating System Terhadap Aliran Fluida Logam Dan Nilai Kekerasan Pada Pengecoran Aluminium Daur Ulang Menggunakan Sand Casting’, *Jurnal Kajian Teknik Mesin*, 5(2), Pp. 104–115. Available At: <https://doi.org/10.52447/jktm.v5i2.4186>.
- Tjitro, S. (2001) ‘Pengaruh Bentuk Riser Terhadap Cacat Penyusutan Produk Cor Aluminium Cetakan Pasir’, *Dosen Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Mesin*, 3(2), Pp. 41–46. Available At: <http://puslit.petra.ac.id/journals/mechanical/41>.
- Triadi, M.T. And Ambo, S.N. (2021) ‘Aplikasi Perhitungan Komposisi Material Pengecoran Logam (Casting) Berbasis Android’, *Jurnal Sistem Informasi, Teknologi Informasi Dan Komputer*, 12(1), Pp. 24–30. Available At: <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/just-it/index>.
- Wafir Dini Fauzan (2019) *Pengaruh Variasi Temperatur Perlakuan Age Hardening Pada Aluminium Paduan 6061 Terhadap Sifat Kekerasan, Struktur Mikro Dan Laju Korosi Dalam Larutan Hcl 1M*. Institut Teknologi Surabaya.
- Young, H. And D.Freedman, R.A. (2012) *University Physics With Modern Physics*. Pearson.