

PENGARUH VARIASI PENAMBAHAN TEMBAGA TERHADAP NILAI KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKRO PADA REMELTING PISTON

Fitri Alfiana.¹, Sigit Mujiarto.², Sri Widodo.³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tidar

Jl. Kapten Suparman No. 39 Magelang, Indonesia

e-mail: ¹fitrialfiana07@gmail.com, ²mujiarto_76@yahoo.co.id, ³sriwidodo@untidar.ac.id.

Abstrak

Aluminium memiliki kelebihan dibandingkan logam lain, diantaranya titik cair yang rendah, bobotnya ringan, tahan terhadap korosi, serta sebagai konduktor panas dan listrik. Tetapi dalam pengaplikasiannya, aluminium masih memiliki kelemahan dalam sifat mekanik. Penelitian ini, bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan tembaga terhadap sifat mekanik dan fisis dari paduan aluminium. Hasil material dari penelitian ini juga diharapkan dapat diaplikasikan sebagai bahan baku teknik pembuatan paku keling yang memerlukan kekerasan cukup tinggi.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu dengan piston dilebur terlebih dahulu dalam tungku pembakaran kemudian dituang kedalam cetakan pasir sehingga menjadi sebuah ingot. Ingot tersebut dilebur kembali dengan dilakukan penambahan variasi tembaga sebesar 3% dan 6%. Kemudian dilakukan uji kekerasan dan struktur mikro.

Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa tembaga dapat meningkatkan sifat mekanik. Nilai kekerasan tertinggi terdapat pada 6% Cu yaitu 300,66 VHN, dan nilai terendah terdapat pada 0% Cu yaitu 112,6 VHN. Semakin bertambahnya komposisi Cu maka Al₂Cu yang terbentuk juga semakin besar sehingga fasa kristal Al semakin tegang, dengan semakin tegang fasa kristal Al inilah yang menyebabkan semakin tinggi nilai kekerasan dengan naiknya persentase Cu.

Kata kunci: Aluminium-silikon, Tembaga, Pengecoran, Kekerasan, Struktur mikro

Abstract

Aluminum has advantages compared to other metals, releasing melting points that are low, lightweight, resistant to corrosion, and also as a conductor of heat and electricity. But in its application, aluminum still has weaknesses in its mechanical properties. This study discusses analyzing copper on the mechanical and physical properties of aluminum alloys. The results of the material from this study are also expected to be applied as a raw material for making rivets that require high intelligence.

The method used in this study, namely the piston is melted first in a furnace and then poured into a sand mold so that it becomes an ingot. These ingots were re-melted with 3% and 6% copper variations. Then failure and microstructure testing is carried out.

The results of the study show how copper can increase mechanical properties. The highest worst value at 6% Cu is 300.66 VHN, and the lowest value is at 0% Cu which is 112.6 VHN. The higher the composition of Cu, the higher the Al₂Cu that is formed so that the Al crystalline phase becomes more tense, the easier the higher Al crystal phase increases the value with increasing Cu.

Keywords: Aluminum-silicon, Copper, Casting, Hardness, Microstructure

1. PENDAHULUAN

Perkembangan sektor industri yang semakin berkembang pesat menimbulkan banyaknya penggunaan bahan teknik untuk menunjang sektor industri. Bahan teknik secara global dapat dibagi menjadi dua yaitu bahan logam dan bahan bukan logam. Bahan logam dapat dikelompokkan dalam dua kelompok yaitu logam besi (*ferro*) dan logam bukan besi (*non ferro*). Untuk saat ini penggunaan logam *ferro* seperti besi dan baja masih mendominasi dalam perencanaan-perencanaan mesin maupun dalam bidang konstruksi. Sedangkan penggunaan logam non ferro yang terus meningkat dari tahun ke tahun yaitu logam aluminium (Smith, 1995 :400). Hal ini terlihat dari urutan penggunaan logam paduan aluminium yang menempati urutan kedua setelah penggunaan logam besi atau baja, dan diurutan pertama untuk logam non ferro (Smith, 1995).

Meningkatnya penggunaan logam ini karena aluminium memiliki beberapa kelebihan dibanding logam lain, diantaranya titik cair yang rendah, bobotnya ringan, tahan terhadap korosi, serta sebagai konduktor panas dan listrik yang baik. Berdasarkan kelebihan-kelebihan tersebut membuat aluminium banyak dipakai dalam berbagai bidang, misalnya pada bidang otomotif, konstruksi pesawat terbang, perlengkapan rumah tangga, pembangunan gedung, dan lain-lain. Pada bidang otomotif aluminium digunakan untuk pembuatan torak, kepala silinder, piston, pelek, dan lain-lain.

Walaupun aluminium memiliki banyak kelebihan dibanding logam lainnya, tetapi dalam pengaplikasian dibidang teknik aluminium masih memiliki kelemahan yaitu sifat mekanik aluminium kurang baik terutama pada kekerasan, batas cair, dan regangannya. Sehingga membuat aluminium murni tidak dapat dipakai sebagai bahan konstruksi. Unsur-unsur paduan yang digunakan untuk meningkatkan sifat mekanik aluminium adalah tembaga, silikon, mangan, magnesium, dan unsur-unsur lainnya. Dimana paduan aluminium tersebut dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis yaitu: jenis Al-murni, jenis Al-Cu, jenis Al-Cu-Si, jenis Al-Si, jenis Al-Si-Mg, jenis Al-Mg, jenis paduan Al tahan panas, dll. Paduan aluminium dengan silikon memperbaiki permukaan menjadi baik, tanpa kegetasan panas dan sangat baik untuk paduan coran. Selain itu, paduan aluminium dengan silikon mempunyai ketahanan korosi yang baik, ringan, koefisien pemuaian yang kecil serta mampu menghantarkan listrik dengan baik. Aluminium dengan tembaga akan meningkatkan sifat mekanik, aluminium dengan magnesium akan menyebabkan paduan bertambah ringan serta meningkatkan ketahanan terhadap *impact*, dan sebagainya. (Surdia, T., 2005).

Penambahan unsur tembaga pada paduan aluminium-silikon yang sesuai dapat meningkatkan kekuatan mekanik yang diinginkan. Pengaruh penambahan tembaga terhadap sifat mekanik atau kekerasan yang menggunakan paduan aluminium-silikon ditambahkan tembaga dalam bentuk silinder pejal dengan variasi 0% - 4% menghasilkan kekerasan yang meningkat tetapi untuk ekspansi termalnya pada komposisi 2% yang memiliki titik maksimum sebesar $230 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Untuk penelitian selanjutnya yang sejenis sangat baik jika mencoba memilih penambahan tembaga (Cu) diatas 4% dan menggunakan tembaga jenis lainnya (Kimiarta dan Ardhyanta, 2015).

Dengan adanya penelitian ini, diharapkan paduan hasil coran mempunyai sifat mekanik yang baik sehingga dapat meningkatkan daya guna paduan aluminium dengan mengatur komposisi berat tembaga (Cu) dan jenis tembaga yang digunakan sehingga sangat

bermanfaat untuk pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Hasil material dari penelitian ini juga diharapkan dapat diaplikasikan sebagai bahan baku teknik pembuatan pada industri aluminium sektor bangunan seperti pembuatan paku keling yang memerlukan kekerasan cukup tinggi.

2. METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat

Pengujian komposisi kimia dilaksanakan di Laboratorium Politeknik Manufaktur Ceper. Proses pengecoran dilaksanakan di Laboratorium Politeknik Manufaktur Ceper, Klaten. Proses pengujian kekerasan dilaksanakan di Laboratorium bahan teknik Universitas Tidar. Proses pengambilan foto struktur mikro dilaksanakan di Laboratorium bahan teknik sekolah vokasi teknik mesin Universitas Gajah Mada.

Proses penelitian dan pengujian ini dilakukan dalam waktu 4 bulan.

B. Tahapan Penelitian

Peralatan dan Bahan yang Dibutuhkan

Dalam proses penelitian ini digunakan beberapa alat dan bahan untuk dapat menunjang penelitian ini. Alat dan bahan yang digunakan yaitu:

Alat yang digunakan :

Untuk pengecoran

- Tungku pemanas
- Kipas angin / *blower*
- Timbangan digital
- Timbangan jarum
- Cetakan pasir (kayu)
- Pasir merah

Untuk proses pemotongan dan penghalusan

- Gerinda, untuk memotong spesimen
- Mesin Frais
- Tang, untuk menjepit specimen
- Amplas, untuk menghaluskan permukaan specimen
- Mesin polishing
- Autosol

Untuk pengujian

- Alat *micro vickers hardness*
- Mikroskop Mikrostruktur
- Alat uji komposisi kimia
- *FLUKE Laser Infrared Thermometer*

Bahan yang digunakan :

- Limbah piston yang ada dipasaran
- Serbuk tembaga dengan komposisi 100% Cu *grain size* $\leq 0,071$ mm

Proses Pengecoran

Langkah yang dilakukan pada proses pengecoran antara lain :

Proses pengecoran I

- a. Menyiapkan piston sebanyak 10 kg.
- b. Membersihkan piston dari sisa-sisa pembakaran dan ring serta batang yang bukan terbuat dari paduan aluminium agar hasil pengecoran menghasilkan paduan aluminium.
- c. Menyiapkan cetakan coran.
- d. Meleburan piston hingga mencapai temperatur 670° C. Proses ini bertujuan agar komposisi kimia pada piston yang akan digunakan setara.
- e. Proses penuangan coran kedalam cetakan pasir. Dalam proses penuangan diperlukan pengaturan temperatur penuangan, hal ini karena temperatur penuangan banyak sekali mempengaruhi kualitas coran, temperatur penuangan yang terlalu rendah menyebabkan pembekuan pendek, kecairan yang buruk dan menyebabkan kegagalan pengecoran. Selain itu dalam penuangan penting sekali dilakukan dengan cepat.
- f. Hasil coran dibongkar dari cetakan setelah suhu penanganan yang wajar (setelah benda cetakan membeku dan dingin).
- g. Setelah cetakan dibongkar benda cor dibersihkan dan menghilangkan sisa pasir dari proses pencetakan tadi. Hasilnya adalah ingot paduan aluminium-silikon yang akan digunakan sebagai bahan dasar pengecoran untuk variasi penambahan 3% Cu dan 6% Cu.

Proses Pengecoran II

- a. Menyiapkan ingot paduan aluminium-silikon sebanyak 3 kg.
- b. Menyiapkan dan menimbang serbuk tembaga dengan berat 90 gram untuk variasi 3% Cu dan 180 gram untuk variasi 6% Cu.
- c. Melebur piston seberat 3 kg hingga mencapai temperatur 670° C. Kemudian memasukkan tembaga 60 gram. Tunggu hingga menjadi larutan sempurna.
- d. Menuang coran kedalam cetakan pasir. Dalam proses penuangan diperlukan pengaturan temperatur penuangan, hal ini karena temperatur penuangan banyak sekali mempengaruhi kualitas coran, temperatur penuangan yang terlalu rendah menyebabkan pembekuan pendek, kecairan yang buruk dan menyebabkan kegagalan pengecoran. Selain itu dalam penuangan penting sekali dilakukan dengan cepat.
- e. Hasil coran dibongkar dari cetakan setelah suhu penanganan yang wajar (setelah benda cetakan membeku dan dingin).
- f. Setelah cetakan dibongkar benda cor dibersihkan dan menghilangkan sisa pasir dari proses pencetakan tadi. Kemudian dilakukan penghalusan dengan menggunakan mesin frais dan amplas.
- g. Lakukan proses dari nomor 1 hingga 6 dengan variasi berat tembaga 180 gram.

Pengujian Kimia

Uji komposisi kimia dilakukan bertujuan untuk mengetahui kandungan unsur kimia yang terdapat pada piston yang akan digunakan sebelum dilakukannya suatu penelitian. Pengujian komposisi kimia dilakukan dengan menggunakan standar ASTM E1251. Adapun langkah-langkah untuk mengamati uji komposisi kimia adalah sebagai berikut:

- a. Menyiapkan sampel benda kerja dengan ukuran 60 mm x 50 mm x 16 mm.
- b. Nyalakan semua peralatan pendukung dan sambungkan dengan arus listrik (*Argon, Printer, dll*).

- c. Tunggu beberapa saat sampai *spektrometer* siap dilakukan pengujian (kurang lebih 60 menit).
- d. Setelah ada keterangan *spektro ready* (Temperatur OK), pilih program yang akan diuji (Al, Al-Si-Cu, atau Gun Metal) sesuai barang yang akan diuji.
- e. Lakukan standarisasi alat uji.
- f. Lakukan pengujian pada sampel uji (sampel uji sebelumnya harus dipreparasi sebelumnya, (Al dengan dibubut).
- g. Lakukan analisa sampel uji :
 - Letakkan sampel pada kedudukan kerja.
 - Tekan *start* pada alat dimana analisa sampel mulai dilakukan, penekanan tombol *start* jangsan dilepas sampai bunyi *spark* terdengar.
 - Lakukan penembakan minimal 3 kali pada tempat yang berbeda.
 - Setiap selesai penembakan lakukan pembersihan pada pin penembakan.
 - *Print* hasil uji yang didapatkan.
- h. Proses analisa selesai.

Proses Pengujian Kekerasan

Uji kekerasan *vickers* dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui nilai kekerasan spesimen uji dengan alat uji kekerasan *microhardness tester* model FM-300 menggunakan beban injek 50 gf dan indentor berbentuk piramida intan dengan sudut 136° pada lima titik dipermukaan spesimen uji. Pengujian kekerasan menggunakan standar ASTM E92. Langkah-langkah dilakukan dalam pengujian kekerasan *vickers* adalah sebagai berikut :

- a. Setelah membentuk dan menghaluskan spesimen, selanjutnya melakukan pengukuran kekerasan bahan dengan alat uji kekerasan *vickers*.
- b. Persiapan benda uji. Benda uji yang digunakan adalah hasil pengecoran paduan aluminium-silikon setelah ditambahkan tembaga yang berukuran : panjang 22 mm, lebar 15 mm, dan tinggi 12 mm.
- c. Dengan pertolongan besaran 50 kali kemudian membaca besar beban dan kedua diagonal dalam gf/ μm .
- d. Menekankan sebuah beban sebesar 50 gram ke benda uji.
- e. Pada permukaan logam akan tinggal bekas penekanan. Setelah itu mengukur diameter bekas penekanan (D_1) dan (D_2) dengan mikroskop ukur.
- f. Menghitung besar kekerasan *vickers* dalam N/mm^2

Proses Pengujian Struktur Mikro

Uji struktur mikro dilakukan dengan tujuan untuk memeriksa sifat fisis material, yaitu: bentuk dan susunan struktur mikro penyusun dari material aluminium cor. Sebelum pengujian, benda uji diratakan dahulu dengan menggunakan mesin *frais* dan dipoles agar kedua permukaan atas bawah tegak lurus saat di letakan pada dudukan mikroskop optik. Pengujian ini dilakukan pada spesimen yang belum dilakukan penambahan tembaga hingga setelah dilakukan penambahan tembaga 3 % dan 6% untuk mengetahui perubahan struktur mikronya. Pengujian struktur mikro dilakukan dengan *olympus metallurgical microscope*, menggunakan standar ASTM E3. Langkah-langkah dilakukan dalam pengujian struktur mikro adalah sebagai berikut :

- Setelah membentuk dan menghaluskan spesimen, selanjutnya melakukan pengujian struktur mikro (spesimen dari proses pengujian kekerasan *vickers*).
- Lakukan etsa pada permukaan spesimen.
- Letakan spesimen pada penjepit mikroskop.
- Lihat pada mikroskop, atur fokus mikroskop hingga struktur mikro terlihat paling jelas (perbesaran yang digunakan 100 kali).
- Lakukan pomotretan pada struktur mikro dengan pembesaran yang diinginkan.
- Ulangi langkah 1 sampai 5 untuk masing-masing spesimen yang berbeda.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Komposisi Kimia Ingot

Pengujian komposisi kimia dari ingot paduan aluminium-silikon dengan ukuran 60 mm x 50 mm x 16 mm yang dilaksanakan di Politeknik Manufaktur (POLMAN) Ceper, Klaten, Jawa Tengah dan diperoleh hasil sebagai berikut :

Tabel 1. Hasil Pengujian Komposisi Kimia

UNSUR	SAMPEL UJI	
	19/S550 (%)	Deviasi
Al	81,05	1,447
Si	18,0	1,56
Fe	0,08338	0,0675
Cu	0,325	0,0248
Mn	0,0325	0,0054
Mg	<0,0500	<0,0000
Cr	<0,0150	<0,0000
Ni	0,0222	0,0032
Zn	<0,0100	<0,0000
Sn	<0,0500	<0,0000
Ti	0,035	0,0182
Pb	<0,0300	<0,0000
Be	0,0002	0,0000
Ca	0,0031	0,0001
Sr	<0,0005	<0,0000
V	0,0135	0,0064
Zr	0,359	0,0461

Berdasarkan pengkodean untuk aluminium cor yang di susun oleh *the International Alloy Designation System* (IADS). Klasifikasi tersebut didasarkan dari penamaan asosiasi aluminium di Amerika Serikat maka dari hasil uji komposisi kimia diatas dapat disimpulkan bahwa spesimen dari hasil pengecoran piston yang akan dijadikan sebagai bahan baku pengecoran lebih lanjut diketahui memiliki kandungan utamanya Aluminium sebesar 81% dan Silikon sebesar 18% serta dilakukan peleburan kembali pada produk aslinya kemudian menjadi ingot maka material ini diklasifikasikan sebagai aluminium seri 481.1.

Uji Kekerasan *Vickers*

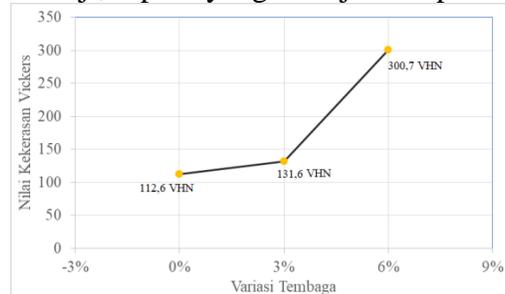
Pengujian *vickers* yang dilakukan di Laboratorium Bahan Teknik Universitas Tidar bertujuan untuk mengetahui nilai kekerasan spesimen uji dengan alat uji kekerasan *microhardness tester* model FM-300 menggunakan beban injek 50 gf dan *indentor* berbentuk piramida intan dengan sudut 136° pada lima titik dipermukaan spesimen uji. Berikut hasil pengujiannya.

Tabel 2. Hasil Uji Kekerasan *Vickers*

No	Spesimen Uji	Kekerasan (VHN)
1.	0% Cu	112,6
2.	3% Cu	131,1
3.	6% Cu	300,66

Nilai kekerasan paku keling aluminium : 21,176 VHN.

Dari tabel 1. Spesimen uji terbagi menjadi antara 3, yaitu variasi 0% Cu, 3% Cu dan 6% Cu dapat disajikan hasil dari nilai kekerasan dalam grafik untuk mengetahui naik turunnya dari setiap spesimen uji, seperti yang ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Grafik Hubungan Kekerasan Vickers terhadap Variasi Tembaga

Berdasarkan tabel dan grafik diatas bahwa ingot pengecoran piston sebelum dilakukan penambahan tembaga dan setelah dilakukan penambahan tembaga berbeda. Kemudian dapat dideskripsikan bahwa pada ingot setelah dilakukan penambahan 3% tembaga meningkatkan kekerasan sebesar 17% dari ingot sebelum dilakukan penambahan tembaga dan pada penambahan 6% tembaga meningkatkan nilai kekerasan sebesar 167% dari ingot sebelum dilakukan penambahan tembaga. Kemudian dapat disimpulkan bahwa variasi penambahan tembaga memiliki pengaruh terhadap peningkatan kekerasan paduan aluminium – silikon. Dilihat dari Gambar 4.3 nilai kekerasan paduan aluminium silikon (Al-Si) cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya kadar tembaga.

Kesimpulan paduan ini terbukti dapat digunakan sebagai bahan teknik alternatif pengganti dalam pembuatan paku keling dalam penggunaan khusus bidang mesin.

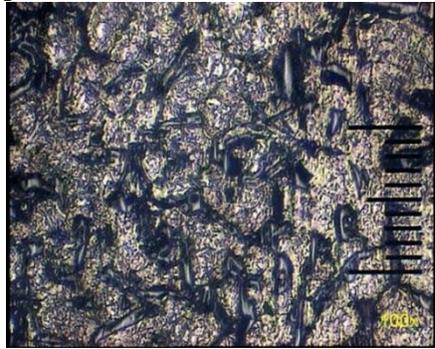
Uji Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro dilakukan untuk mengetahui hasil permukaan spesimen setelah proses pengecoran. Pengujian dilakukan di Laboratorium bahan teknik, sekolah vokasi Teknik Mesin Universitas Gajah Mada dengan menggunakan *olympus metallurgical microscope* dengan lensa pembesaran 100 kali untuk menghasilkan foto struktur mikro permukaan dari spesimen uji.



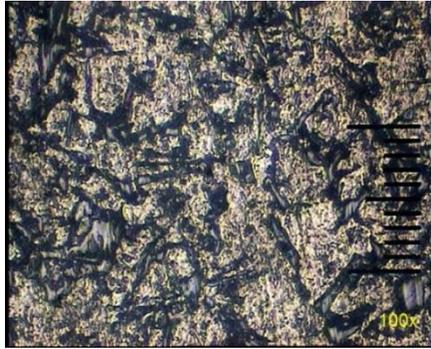
Gambar 2. Struktur Mikro Variasi 0% Cu dengan Perbesaran 100 Kali

Hasil foto struktur mikro dari variasi 0% Cu yang merupakan pengecoran piston menjadi ingot dengan temperatur peleburan 670°C menghasilkan matriks berwarna terang dan kelabu terang masih mendominasi. Butiran-butiran unsur aluminium terlihat masih besar dan bintik-bintik endapan pada fasa yang berwarna terang terlihat masih sedikit. Pada *dendrite* didominasi fase yang berwarna kelabu terang. Terdapat unsur matriks berwarna kelabu kehitam-hitaman namun sedikit sekali. Fasa kelabu kehitam-hitaman ini merupakan unsur Cu yang terdapat dalam piston sebesar 0,325%.



Gambar 3. Struktur Mikro Variasi 3% Cu dengan Perbesaran 100 Kali

Hasil foto struktur mikro dari variasi 3% Cu yang merupakan pengecoran ingot piston dan penambahan 3%Cu dengan temperatur peleburan 900°C menghasilkan matriks berwarna terang, kelabu terang, dan kelabu kehitam-hitaman. Butiran-butiran unsur aluminium pada fasa yang berwarna terang sudah terlihat timbul bintik-bintik endapan berwarna kelabu kehitam-hitaman mengisi ruang diluar *dendrite*. Pada *dendrite* berubah warna menjadi kelabu kehitam-hitaman dengan warna kelabu terang masih mendominasi. Untuk kerapatan antara *dendrite* dengan bagian diluar *dendrite* setelah ditambahkan 3%Cu cenderung sedikit lebih rapat (*solid*). Hal ini dapat disimpulkan bahwa unsur Cu sudah mulai mengisi ruang *dendrite* dan bagian diluar *dendrite*.



Gambar 4. Struktur Mikro Variasi 6% Cu dengan Perbesaran 100 Kali

Hasil foto struktur mikro dari variasi 6% Cu yang merupakan pengecoran ingot piston dan penambahan 6%Cu dengan temperatur peleburan 900°C menghasilkan matriks berwarna terang, kelabu terang, dan kelabu kehitam-hitaman. Butiran-butiran unsur aluminium pada fasa yang berwarna terang terdapat bintik-bintik endapan berwarna kelabu kehitam-hitaman yang semakin jelas dan mengisi ruang diluar *dendrite*. Pada *dendrite* fase kelabu kehitam-hitaman terlihat semakin jelas daripada fase yang berwarna kelabu terang. Untuk kerapatan antara *dendrite* dengan bagian diluar *dendrite* setelah ditambahkan 6%Cu cenderung lebih rapat (*solid solution*). Hal ini dapat disimpulkan bahwa unsur Cu semakin mengisi ruang *dendrite* dan bagian diluar *dendrite* menimbulkan kekerasan yang semakin meningkat.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, data-data yang didapat dan tujuan penelitian yang diperoleh dari pengaruh variasi penambahan unsur tembaga terhadap tingkat kekerasan dan struktur mikro pada remelting piston adalah sebagai berikut :

1. Berdasarkan pengkodean untuk aluminium cor yang di susun oleh *the International Alloy Designation System (IADS)*. Klasifikasi tersebut didasarkan dari penamaan asosiasi aluminium di Amerika Serikat maka dari hasil uji komposisi kimia diatas dapat disimpulkan bahwa spesimen dari hasil pengecoran piston yang akan dijadikan sebagai bahan baku pengecoran lebih lanjut diketahui memiliki kandungan utamanya Aluminium sebesar 81% dan Silikon sebesar 18% serta dilakukan peleburan kembali pada produk aslinya kemudian menjadi ingot maka material ini diklasifikasikan sebagai aluminium seri 481.1.
2. Tembaga dapat meningkatkan kekerasan dari paduan Al-Si karena kandungan tembaga mampu mengikat unsur aluminium dan mampu meningkatkan kekerasan paduan aluminium-silikon sebesar 167,05% dari ingot yang belum ditambahkan Cu. Dengan bertambahnya Cu maka Al_2Cu yang terbentuk juga semakin besar sehingga fasa kristal Al semakin tegang, dengan semakin tegang fasa kristal Al inilah yang menyebabkan semakin tinggi nilai kekerasan dengan naiknya persentase Cu.
3. Pada pengujian struktur mikro menghasilkan 3 fasa antara lain, fasa Al (berwarna terang), fasa Al_2Cu (berwarna kelabu kehitam-hitaman) dan fasa AlSi (berwarna kelabu terang). Membandingkan hasil uji kekerasan dengan hasil struktur mikro setiap spesimen uji dapat disimpulkan bahwa semakin banyak kadar tembaga semakin banyak

struktur yang berwarna kelabu kehitam-hitaman menghasilkan nilai kekerasan yang semakin tinggi.

4. Paduan ini terbukti dapat digunakan sebagai bahan teknik alternatif pengganti dalam pembuatan paku keling dalam penggunaan khusus bidang mesin.

5. SARAN

Saran penulis setelah melakukan penelitian diantaranya :

1. Untuk penelitian selanjutnya yang sejenis, sangat baik kalau dianalisa faktor-faktor atau variabel-variabel lain misal: sifat-sifat logam (keuletan, ketahanan korosi, keausan, kelenturan), proses pengecoran dan perlakuan panas untuk mendapatkan kekuatan mekanis yang diharapkan.
2. Perhatikan saat proses pengecoran, usahakan menggunakan alat pengaman seperti sarung tangan tahan api, masker dan sepatu.
3. Perlu ditambahkan penelitian kontinu untuk pengaplikasian bahan teknik tersebut dalam bentuk paku keling.
4. Selain hal diatas, bagi peneliti yang akan mengadakan penelitian yang relevan di masa mendatang diharapkan hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai bahan masukan dan pertimbangan dalam melakukan penelitian.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam menyusun skripsi terdapat beberapa kesulitan, akan tetapi berkat dukungan dan semangat dari berbagai pihak, maka kesulitan itu dapat teratasi, dengan setulus hati penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Allah SWT atas segala nikmat dan hidayah-Nya, sehingga penulisan skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
2. Kepada kedua orang tua penulis Bapak Sugiyanto dan Ibu Yuli Nur Erawati yang telah memberikan dukungan moral, financial terutama doa dari mereka sehingga penulisan skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
3. Bapak Dr. Ir. Supto Nisworo, M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Tidar.
4. Bapak Wandu Arnandi, S.T., M.Eng., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tidar.
5. Bapak Catur Pramono, S.T., M.Eng., selaku Koordinator Program Studi Teknik Mesin (S1), Fakultas Teknik, Universitas Tidar.
6. Ibu Nani Mulyaningsih, S.T., M.Eng., selaku dosen penguji skripsi yang telah banyak membantu memberikan arahan dan masukan sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
7. Bapak Sigit Mujiarto, S.T., M.Eng., selaku pembimbing I yang telah banyak membantu memberikan arahan, masukan dan semangat sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
8. Bapak Ir. Sri Widodo, M.Eng., selaku pembimbing II yang telah banyak membantu memberikan arahan, masukan dan semangat sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
9. Ibu Lutiyatmi, S.T., M.T., selaku pembimbing yang telah membantu dan membimbing saya selama melakukan pengecoran.

10. Seluruh teman – teman angkatan 2015, seluruh kakak senior Teknik Mesin, dan seluruh mahasiswa Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tidar yang membantu dan selalu memberi dukungan serta motivasi.
11. Dan semua pihak dari luar Universitas Tidar yang membantu dan tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdillah, Fuad, 2009, Pengaruh Tekanan Temperatur Die pada Proses Squeeze Casting terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Piston Berbasis Material Bekas, Jurnal Traksi Vol. 9 No.1, Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Semarang, Semarang.
- Abdillah, Fuad, 2010, Perlakuan Panas Paduan Al-Si pada Prototipe Piston Berbasis Material Piston Bekas, Tesis Pasca Sarjana Teknik Mesin, Universitas Diponegoro, Semarang.
- Annual Book of Standards ASTM, E 1251 - 94, Standard Test Method for Optical Emission Spectrometric Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by the Argon Atmosphere, Point-to-Plane, Unipolar Self-Initiating Capacitor Discharge, West Conshohocken, PA : United States.*
- Annual Book of Standards ASTM, E 3 - 95, Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens, West Conshohocken, PA : United States.*
- Annual Book of Standards ASTM, E 92 - 82, Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials, West Conshohocken, PA : United States.*
- Callister Jr., W.D., 2000, "Fundamentals of Materials Science and Engineering", Interactive e Text, John Wiley & Sons, Fifth Edition, pp. 416, 417, 177 – 181.
- Kimiarta, M. P., Ardhyanta, H., 2015, Pengaruh Penambahan Tembaga (Cu) terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro pada Paduan Aluminium Silikon (Al-Si) melalui Proses Pengecoran, Jurnal Penelitian Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Mu'afax, F. D., Harjanto, B., Suharno, 2013, Pengaruh Variasi Media Pendingin terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Hasil *Remelting* Al-Si Berbasis Limbah Piston Bekas dengan Perlakuan *Degassing*, Jurnal Penelitian Pendidikan Teknik Mesin, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Rogo, G. K. C. J., Suharno, Yadiono, 2013, Pengaruh Variasi Suhu Tuang terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro pada Hasil *Remelting* Aluminium Tromol Supra X dengan Cetakan Logam, Jurnal Penelitian Pendidikan Teknik Mesin, Universitas Sebelas Maret, Surakarta
- Smith, R, 1995, *Chemical Process Design, McGraw Hill International Book Company, Singapore.*
- Sofyan, Bondan T., 2011, Pengantar Material Teknik, Jakarta : Penerbit Salemba Teknika.
- Sumiyanto, Abdunnaser, Pengaruh Proses Hardening dan Tempering terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro pada Baja Karbon Sedang Jenis SNCM 447, Jurnal Penelitian Program Studi Teknik Mesin, Institut Sains dan Teknologi Nasional, Jakarta.
- Surdia, T., Shinroku, S., 2005, Pengetahuan Bahan Teknik, PT. Pradnya Paramita, Jakarta.
- Utama, H., 2009, Pengaruh Penambahan Cu (1%, 3% dan 5%) pada Aluminium dengan *Solution Heat Treatment* dan *Natural Aging* terhadap Sifat Fisis dan Mekanis,

Skripsi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta, Jawa Tengah.

- Wijaya, M. T., Zubaidi, Wijoyo, 2017, Pengaruh Variasi Temperatur Tuang terhadap Ketangguhan Impak dan Struktur Mikro pada Pengecoran Aluminium, Jurnal SIMETRIS vol 8 No. 1, Program Studi Teknik mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Surakarta, Surakarta.
- Wirabuana, R. P., Wibowo, D. B., 2015, Analisis Kekuatan Paku Keling pada *Sub-Assembly* Kampas Rem Bus, JTM (S-1) Vol. 3 No. 1, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang.