

PENGARUH KONSENTRASI Cu TERHADAP SIFAT MEKANIS PADUAN Al-Cu PADA PROSES PEMBEKUAN SEARAH (*UNIDIRECTIONAL SOLIDIFICATION*)**S. Slamet¹ dan Suyitno²**¹ Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muria Kudus
Gondangmanis Bae Kudus 59324² Program Studi Teknik Mesin dan Industri Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada Jl.
Jl. Grafika No. 2 Kampus UGM, Yogyakarta 55281
E-mail: sugeng_hanun@yahoo.co.id; suyitno@ugm.ac.id**Abstrak**

Meningkatkan sifat mekanis bahan logam dapat ditempuh dengan beberapa cara, salah satunya adalah melalui rekayasa pembekuan searah (*unidirectional solidification*). Proses ini dilakukan dengan cara mengatur gradien temperatur sehingga terjadi laju pendinginan lambat. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh konsentrasi Cu pada paduan Al-Cu terhadap sifat mekanis melalui pengujian tarik dan pengujian kekerasan.

Material utama adalah Al- dengan paduan (2,2, 3,1, 4,4, dan 4,7 %Cu) dilebur pada temperatur 700-710 °C menggunakan dapur listrik dengan media pendingin air. Pengujian spesimen dilakukan dengan membandingkan struktur mikro yang terbentuk pada masing-masing konsentrasi. Pengujian sifat mekanis dilakukan dengan membandingkan nilai kekerasan dan kekuatan tarik pada material awal terhadap hasil pembekuan searah pada masing-masing konsentrasi Cu.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa struktur kolumnar terlihat lebih jelas pada konsentrasi 4,4 %Cu dan 4,7 %Cu, sedangkan pada konsentrasi 2,2 %Cu dan 3,1 %Cu struktur kolumnar cenderung sulit terbentuk. Sifat mekanis bahan yang meliputi kekuatan tarik dan kekerasan bahan meningkat dari material awal untuk semua konsentrasi Cu. Al-4,4%Cu mempunyai kekuatan tarik dan kekerasan bahan lebih tinggi dibandingkan dengan Al-(2,2 ; 3,1 dan 4,7% Cu). Hal ini juga dipengaruhi oleh kelarutan unsur Magnesium dan Silikon yang ada dalam paduan.

Kata kunci: pembekuan searah; kolumnar-dendrit; sifat mekanis

PENDAHULUAN

Perbaikan sifat mekanis suatu bahan dapat dilakukan melalui beberapa cara baik melalui perlakuan panas, pengerasan endapan maupun rekayasa pembekuan (Amstead, 1989).

Metode pembekuan searah adalah proses untuk meningkatkan terbentuknya *dendrite arm spacing* dan menurunkan kekasaran butir terutama pada daerah *hypoeutectic* (Oakwood dkk, 2002) serta mengarahkan pertumbuhan butir menjadi searah dengan mengatur laju aliran kalor (Smith dkk, 1967). Metode ini dapat meningkatkan sifat mekanis material dalam hal ketangguhan, kekuatan tarik dan kekuatan mulur (*creep*) (Axmann, 1983).

Aluminium murni memiliki kekuatan dan sifat mekanis yang rendah, maka untuk memperbaiki sifat-sifat mekanisnya harus dipadu dengan unsur lainnya. Paduan Al-Cu mempunyai kelebihan antara lain ketahanan korosi yang baik, sangat ringan, tahan terhadap retak, mampu mesin dan las, koefisien pemuaian yang kecil (Saito dan Surdia, 1992).

Paduan Al-Cu digunakan untuk konstruksi kelung, konstruksi badan pesawat terbang,

impeller pompa dan sudu turbin. Untuk aplikasi dimana membutuhkan kemampuan yang tinggi untuk menahan beban aksial dan kekuatan mulur (*creep*) rendah sangat dibutuhkan orientasi butir searah (Robert, 2000).

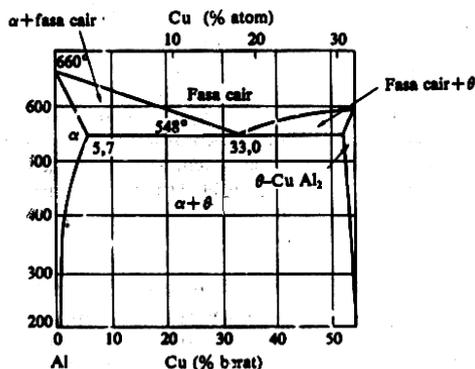
KERANGKA TEORI

Al-Cu adalah kombinasi dari logam aluminium yang mempunyai sifat ringan, tahan korosi, mudah dimesin, dengan tembaga yang mempunyai sifat penghantar listrik yang baik, keuletan yang tinggi dan juga sifat tahan korosi (Surdia dan Saito, 1992).

Paduan Al-Cu dapat digolongkan dalam tiga jenis yaitu *hypoeutectic*, *eutectic* dan *hypereutectic*. Pada paduan Al-Cu dengan komposisi tembaga < 33% disebut *hypoeutectic*. Titik *eutectic* pada paduan Al-Cu terdapat pada kandungan Cu sebesar 31,9 sampai 32,9%. Sedangkan kandungan tembaga >33,0% disebut *hypereutectic* (Murray, 1985).

Diagram fase biner paduan Al-Cu ditunjukkan pada Gambar 1.1. Fase yang terjadi selama proses pembekuan dari ketiga golongan paduan Al-Cu dapat dijelaskan

sebagai berikut: sebagai contoh pada paduan Al-Cu *hypoeutectic* dengan kandungan 5,7% Cu, dengan menurunkan temperatur dibawah garis *liquidus* maka fase yang terjadi adalah L + α dimana pada fase ini sudah mulai terbentuk pengintian dendrit aluminium. Ketika temperaturnya diturunkan lagi dibawah garis *solidus* (548 °C) maka semua fase cair akan berubah menjadi fase padat dan berujung dengan terbentuknya struktur berbentuk dendrit, fase yang terjadi pada kondisi ini adalah $\alpha + \theta$.

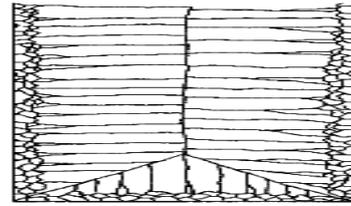


Gambar 1. Diagram fase binary Al-Cu (Surdia dan Saito, 1992).

Titik *eutectic* pada paduan Al-Cu terjadi pada temperatur 548 °C dengan kandungan tembaga 33,0%. Ketika temperatur diturunkan dibawah titik *eutectic* maka reaksi yang terjadi adalah L $\alpha + \theta$, dimana L adalah fase cair, α adalah fase aluminium dan θ adalah fase tembaga. Pada kondisi ini pengintian terjadi secara cepat dan menghasilkan struktur akhir berbentuk dendrit.

Pada paduan Al-Cu dengan kandungan Cu >33,0% disebut *hypereutectic*. Ketika temperatur diturunkan dibawah garis *liquidus* maka fase yang terbentuk adalah L + θ , dimana pada fase ini sudah mulai terbentuk pengintian fase tembaga. Selanjutnya dengan menurunkan temperatur lebih rendah lagi sampai melewati garis *solidus* maka semua fase cair akan berubah menjadi fase padat dan berakhir dengan menghasilkan struktur dendrit $\alpha + \theta$.

Proses pembekuan coran sebagaimana pada Gambar 1.2 dimulai dari bagian logam yang bersentuhan dengan cetakan, yaitu ketika panas dari logam cair diambil oleh cetakan sehingga bagian logam yang bersentuhan dengan cetakan itu mendingin sampai titik beku, kemudian inti kristal tumbuh (Fleming,1974).



Gambar 2. Struktur mikro logam pada cetakan (Colton, 1992)

Bentuk butir dan ukurannya sangat tergantung pada pertumbuhan butir selama proses pembekuan. Meski besar butir dinyatakan dalam ukuran diameter, sangat sedikit sekali butiran logam fase tunggal yang bentuknya bulat. Bentuk butir lain adalah bentuk pipih, kolumnar dan dendritik (Van Vlack dan Sriati, 1983).

Struktur selular terjadi melalui proses pendinginan superkomposisi dengan bentuk butir saling sejajar dan searah pertumbuhan kristal. Adanya gradien temperatur, menyebabkan bidang antar permukaan menjadi kurang stabil dan cenderung tumbuh kearah lain. Proses ini berlangsung terus-menerus sampai akhirnya terbentuk sederetan struktur selular yang disebut juga struktur *closed packed*.

Struktur Selular dendrit terjadi bila gradien temperatur berkurang dan luas daerah pendinginan superkomposisi semakin dominan, karakteristiknya akan berubah menjadi struktur dendrit. Bentuk selular dengan ujung semi-lingkaran akan berubah menjadi struktur dendrit dengan ujung berbentuk piramid dan bahkan berbentuk kubah. Secara keseluruhan struktur selular dendrit membentuk cabang dari jaringan-jaringan yang saling berhubungan satu dan lainnya.

Kolumnar-dendrit merupakan bentuk butir kristal yang menyerupai cabang pohon. Struktur kolumnar-dendrit ditunjukkan pada Gambar 1.3



Gambar 3. Struktur kolumnar dendrit

Struktur ini terjadi jika gradien temperatur pada permukaan coran besar, misalnya pada

pegecoran dengan cetakan logam (Surdia dan Saito, 1992; Rusli, 1995). Sementara struktur *equiaxed* terjadi karena laju pendinginan yang sangat tinggi, sehingga mudah terjadi makro segregasi.

Laju pembekuan sangat menentukan struktur butir yang terbentuk. Laju pembekuan antara 0,01-0,5 $\mu\text{m}/\text{detik}$ didapatkan pertumbuhan butir kolumnar-dendrit dari dasar sepanjang 2 inci pada baja karbon rendah. Butiran dendrit semakin kasar dengan penambahan laju pembekuan (Smith dkk, 1967 ; Oakwood dkk, 2002 ; Amauri dkk, 2002). Penurunan laju pembekuan antara 0,03–0,2 $\mu\text{m}/\text{detik}$ didapatkan bentuk butir *primary dendrite arm spacing*, *secondary dendrite arm spacing*, *dendrite tipe radius* dan *mushy zone depth* yang lebih jelas (Gunduz dkk, 2001).

Konsentrasi unsur pada paduan akan mempengaruhi pembentukan struktur butir dendrit. Pada paduan Al-Cu dengan variasi konsentasi, perubahan struktur dendrit mulai terjadi pada temperatur 973 K (Gunduz dkk, 2001). Konsentrasi Zn yang rendah (<30 % berat) pada paduan Al-Zn, lebih sulit terbentuk struktur butir dendrit pada daerah eutektik (Gonzales dan Rappaz, 2006).

Pengaruh gradien temperatur (G) dan laju pembekuan (V) yang rendah pada masing-masing konsentrasi akan meningkatkan *primary dendrite arm spacing* (λ_1), *secondary dendrite arm spacing* (λ_2), *dendrite tipe radius* (R), dan *mushy zone depth* (d) (Kou, 1987; Gunduz dkk, 2001).

Proses pembekuan searah meningkatkan sifat mekanis material seperti : kekerasan, kekuatan mulur, kekuatan bending dibandingkan dengan proses pengecoran konvensional (Smith dkk, 1967; Axmann, 1983; Piwonka, 1992; Kim, dkk, 2000).

METODOLOGI

Al-4,7%Cu dalam bentuk ingot sebagai material dasar, untuk membuat beberapa variasi konsentrasi Cu dilakukan dengan menambahkan Al 99% dengan perbandingan berat. Tabel 1. menunjukkan komposisi paduan Al-(2.2, 3.1, 4.4, 4.7%Cu) setelah dilakukan uji dengan *spectrometer*.

Tabel 1. Komposisi kimia paduan (%)

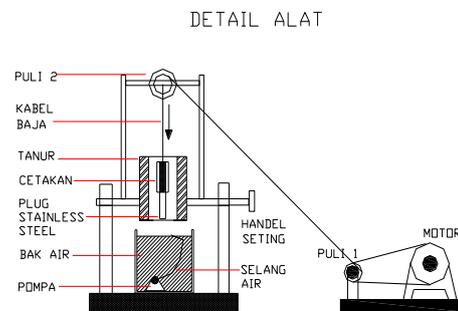
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
0,1	0,2242	2,221	0,0089	0,0052	0,065
Ti	Cr	Ni	Pb	Sn	Al
0,0147	0,0043	0,0008	0,002	0,0043	97,35

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
0,12	0,2866	3,189	0,0090	0,0063	0,0708
Ti	Cr	Ni	Pb	Sn	Al
0,0150	0,0060	0,0014	0,0041	0,0079	96,28

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
0,46	0,0986	4,450	0,000	0,4978	0,0345
Ti	Cr	Ni	Pb	Sn	Al
0,0026	0,0470	0,0003	0,0036	0,0081	94,39

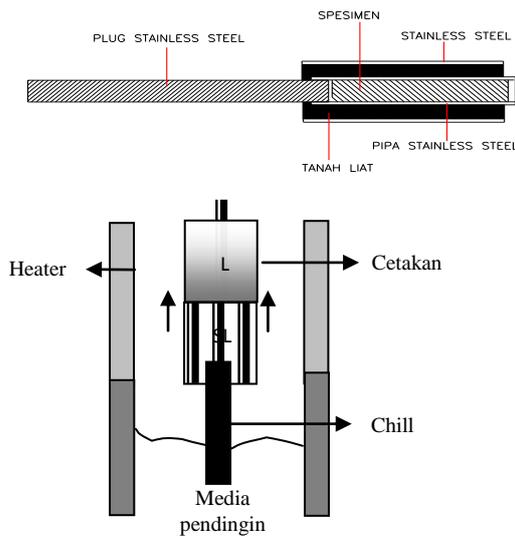
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
0,12	0,1468	4,767	0,0135	0,0071	0,0868
Ti	Cr	Ni	Pb	Sn	Al
0,0085	0,0082	0,0013	0,0039	0,0089	94,83

Proses untuk menurunkan komposisi sampai dengan menuang ke dalam cetakan dilakukan dengan menggunakan dapur peleburan konvensional dengan temperatur tuang 700 °C. Proses pembekuan searah dilakukan dengan cara melebur kembali logam yang telah ada dalam cetakan dengan menggunakan dapur listrik sampai temperatur 700-710 °C. Besarnya pengaruh komposisi yang ada pada paduan mulai terjadi pada temperatur tinggi yaitu $\geq 973 \text{ K}$ (Gunduz dkk, 2001). Setelah itu cetakan diturunkan untuk melakukan proses pendinginan sampai batang *chill* masuk kedalam media air sepanjang 5 cm dan ditahan selama ± 10 menit. Gambar 1.4 dan 1.5 menunjukkan peralatan dan mekanisme pembekuan searah.



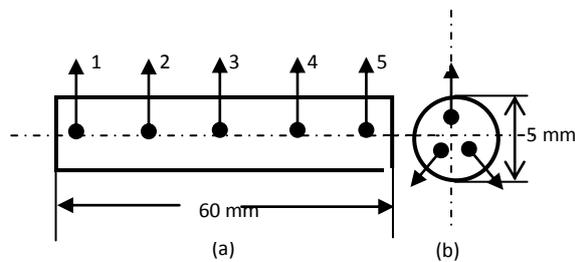
Gambar 4. Peralatan pembekuan searah

Cetakan terbuat dari logam dengan diameter dalam 5 mm, diameter luar 6 mm dan panjang 100 mm. Untuk menghambat pembekuan dari arah samping digunakan tanah liat (*clay*) yang menyelimuti seluruh permukaan cetakan. Gambar 1.6 menunjukkan desain cetakan untuk pembekuan searah.



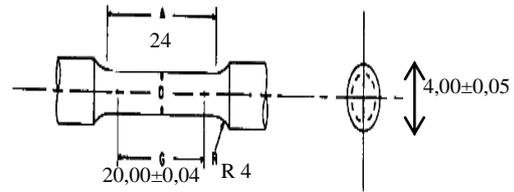
Gambar 5. Cetakan pembekuan searah

Pengujian kekerasan Brinell menggunakan indentor bola baja dengan diameter 2,5 mm dan beban 60 kg. Mesin yang digunakan untuk pengujian ini adalah Weinheim-Birkenau tipe 38505. Pengujian dilakukan pada lima titik yang berbeda mulai dari dasar cetakan ke atas pada spesimen potongan melintang sepanjang 60 mm dan tiga titik pada potongan membujur dengan diameter 5 mm, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Pengujian kekerasan (a) potongan membujur (b) potongan melintang

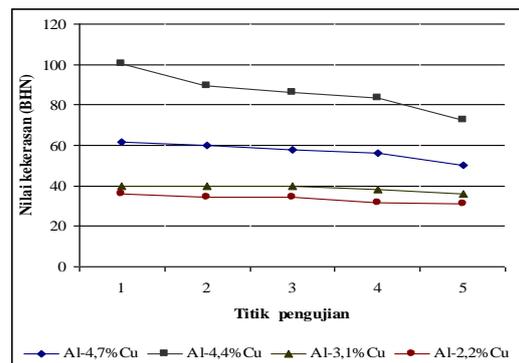
Pengujian kekuatan tarik menggunakan Servopulser SHIMADZU tipe EHF-EB20. Spesimen uji tarik ini dibuat berdasarkan standar ASTM B 557M (ASTM, 2002) sebagaimana di tunjukkan pada Gambar 7.. Beban maksimal yang diberikan pada spesimen sebesar 2000 kg.



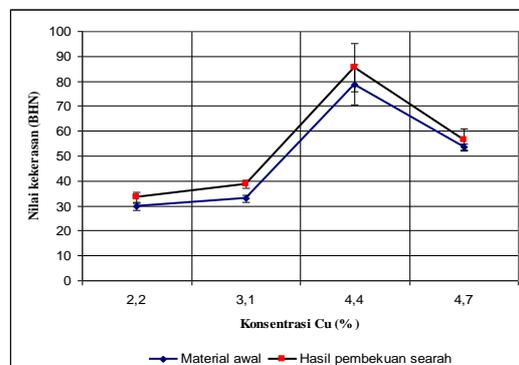
Gambar 7. Spesimen uji tarik (ASTM, 2002)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil nilai kekerasan yang dilakukan pada potongan membujur berdasar titik pengujian, menunjukkan terjadi penurunan nilai kekerasan dari pangkal hingga ke atas cetakan akibat makin cepatnya laju pendinginan. Paduan Al-4,4% Cu menurun nilai kekerasannya sebesar 7,73%, Al-4,7% Cu menurun nilai kekerasannya 5,07%, sedangkan Al-3,1% dan 2,2 % Cu nilai kekerasannya relatif stabil dari dasar hingga atas cetakan. Gambar 8. menunjukkan hubungan antara titik pengujian dari pangkal ke atas cetakan terhadap nilai kekerasan paduan.



Gambar 8. Nilai kekerasan Al-Cu dari pangkal hingga jarak 60 mm

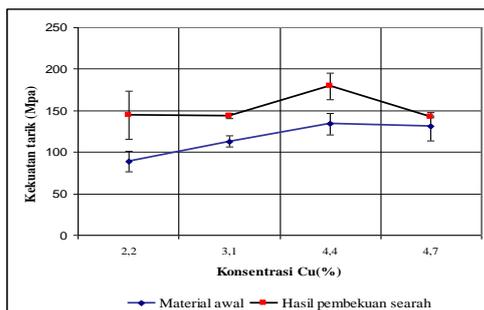


Gambar 9. Nilai kekerasan paduan Al-Cu arah membujur

Nilai kekerasan hasil pembekuan searah yang dilakukan pada spesimen yang dipotong membujur sepanjang 60 mm ditunjukkan pada Gambar 9. Pada gambar tersebut memperlihatkan peningkatan kekerasan pada semua konsentrasi Cu.

Material awal Al-4,4%Cu menunjukkan peningkatan nilai kekerasan yang relatif besar mencapai 58,24% dibanding Al-3,1%Cu, hal ini disebabkan adanya konsentrasi magnesium yang relatif besar sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1. Sedangkan nilai kekuatan tarik gambar 10. memperlihatkan dengan jelas hubungan antara konsentrasi Cu (%) dengan kekuatan tarik, dimana kekuatan tarik dari paduan berbanding lurus dengan nilai kekerasannya. Konsentrasi Cu akan meningkatkan kekuatan tarik paduan lebih tinggi dari kekuatan tarik material awalnya.

Hasil pengujian tarik yang dilakukan menunjukkan bahwa struktur hasil pembekuan searah butir kolumnar-dendrit pada paduan Al-Cu akan meningkatkan kekuatan mekanis (Kim, dkk, 2000; Axmann, 1983).



Gambar 10. Hasil uji tarik paduan Al-Cu

KESIMPULAN

Konsentrasi Cu juga mempengaruhi sifat mekanis paduan. Proses pembekuan searah meningkatkan sifat mekanis paduan dari material awal pada semua variasi konsentrasi Cu. Paduan Al-4,4%Cu hasil pembekuan searah menunjukkan peningkatan kekerasan yang tinggi 85,41 BHN dan kekuatan tarik sebesar 179,28 MPa. Peningkatan kekerasan dan kekuatan tarik Al-4,4%Cu juga disebabkan adanya unsur magnesium dan silikon yang relatif besar. Penambahan konsentrasi 4,7%Cu menyebabkan peningkatan segregasi yang dapat menyebabkan penurunan sifat mekanisnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Amstead B.H. dkk, 1989, *Teknologi Mekanik edisi 7*, Erlangga, Jakarta, pp.156-157.
- Axmann.W, 1983, *Dynamic Directional Solidification*, Workshop RWTH Aachen, pp.71-95.
- Fleming,M.C, 1974, *Solidification processing*, Mc Graw-Hill Book Company, New York,pp.181-183.
- Gunduz.M and Cadirh.E ,2001, *Directional solidification of Aluminium-Copper alloys*, Elsevier,pp.167-185.
- Murray J.L,1985, *Binary Alloy Phase Diagrams*, *Int. Met. Rev. Trans. Metal. Soc. AIME*.
- Oakwood T.G, Goodrich G.M,2002, *Role of Gravity Forces on the Directional Solidification of Gray Cast Iron*, American Foundry Society, USA, pp. 1-17.
- Robert S.G, 2000, *High Performance Alloys*, Trans Tech Publications LTD,USA.
- Rappaz, Michel, Beckermann,C, dan Trivedi,R, 2004, *Solidification Processes and Microstructures*, TMS, USA, pp. 225,
- Smith.L and Beeley P.R, 1967, *Controlled directional solidification of steel*, Leeds University, pp.330-333.
- Surdia dan Saito, S., 1992, *Pengetahuan bahan teknik*, P.T. Pradnya Paramitha, Jakarta. pp. 135.
- Sindo Kou,1987, *Welding Metallurgy*, John Wiley and Sons, Wisconsin, pp.129-140.
- Van Vlack. H, Lawrence, dan Djaprie, S,1983, *Ilmu dan Teknologi Bahan*, Erlangga, Jakarta, pp. 225-231