

PENGARUH *HOLDING TIME* PADA PROSES *AGE HARDENING* TERHADAP KEKERASAN KOMPOSIT AL-CU YANG DIPERKUAT SERBUK *FLY ASH*

*M. Faizin Alamsyah¹, Sulardjaka²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*Email: mr_alam_roma@live.com

Abstrak

Komposit adalah material yang dibuat dengan menggabungkan dua atau lebih bahan penyusun yang berbeda dalam hal bentuk dan komposisinya. Komposit matriks logam memiliki sifat yang tahan terhadap korosi dibandingkan dengan logam tanpa penguat. Aluminium merupakan salah satu material yang digunakan sebagai matrik pada pembuatan komposit yang disebut *Aluminium Metal Matrix Composite*. Proses *age hardening* adalah suatu proses perlakuan panas yang terkontrol dengan tujuan untuk memperbaiki sifat mekanis dari suatu paduan. Pada penelitian ini komposit Al-Cu-*fly ash* dengan komposisi 5%, 10% dan 15% dilakukan *aging* dengan variasi *holding time* 1 jam, 2 jam dan 4 jam. Dimana pembuatan komposit tersebut diperoleh dengan cara pengecoran *stir cast*. Komposit yang dihasilkan kemudian dimasukkan ke dalam *furnace chamber* untuk dilakukan proses *age hardening*. Proses ini terdiri dari tiga tahap, tahap pertama yaitu *solution treatment* yang bertujuan untuk menghasilkan fasa α , tahap kedua yaitu *quenching* atau pendinginan cepat dan tahap ketiga yaitu *aging* bertujuan untuk memunculkan butir presipitat. Nilai kekerasan dari komposit dalam penelitian ini meningkat setelah mengalami perlakuan *age hardening*. Proses ini memberikan peningkatan nilai kekerasan yang tinggi pada komposit Al-Cu yang diperkuat dengan serbuk *fly ash* dengan komposisi 15%. Selain disebabkan karena adanya uncur Cu yang dapat larut padat ke dalam aluminium sehingga mempengaruhi nilai kekerasannya, penambahan serbuk *fly ash* juga memberikan dampak yang cukup tinggi pada tingkat kekerasan komposit.

Kata kunci: *age hardening, fly ash, aging, presipitat, holding time.*

PENDAHULUAN

Komposit adalah material yang dibuat dengan menggabungkan dua atau lebih bahan penyusun yang berbeda dalam hal bentuk dan komposisinya. Komposit matriks logam memiliki sifat yang tahan terhadap korosi dibandingkan dengan logam tanpa penguat. Aluminium merupakan salah satu material yang digunakan sebagai matrik pada pembuatan komposit yang disebut *Aluminium Metal Matrix Composite*. Hasil komposit yang diperoleh dengan proses pembuatan tersebut mempunyai ketangguhan yang tinggi dan stabil pada temperatur tinggi. Komposit jenis ini dapat diaplikasikan pada berbagai komponen mesin seperti turbin, roket, piston, penukar panas, struktur pesawat terbang dan kemas elektronik [1].

Beberapa tahun terakhir ini telah banyak dikembangkan Al-Cu-*fly ash* sebagai komposit matriks logam. Aluminium yang dikenal sebagai logam yang mempunyai sifat ringan, tahan korosi, penghantar listrik yang baik digunakan sebagai matriks sedangkan *fly ash* berfungsi sebagai penguat. Penggunaan *fly ash* ternyata dapat menghasilkan komposit aluminium dengan sifat mekanik yang baik dengan biaya murah yang dapat bersaing dengan komposit sejenis lainnya. Untuk menambah kekuatan dari sifat mekanis dari logam yang digunakan dalam komposit tersebut salah satu caranya yaitu dengan melakukan perlakuan panas. Perlakuan panas pada logam dapat mengubah struktur mikro dari

logam sehingga akan berpengaruh terhadap sifat mekanisnya. Dengan perlakuan panas dapat membentuk sifat logam sesuai dengan penggunaan dari logam tersebut [1].

DASAR TEORI

Aluminium merupakan logam *non ferro* yang memiliki sifat ringan dan tahan karat. Aluminium dipakai sebagai paduan berbagai logam murni, sebab tidak kehilangan sifat ringan dan sifat-sifat mekanisnya dan mampu cornya diperbaiki dengan menambah unsur-unsur lain. Unsur-unsur paduan itu adalah tembaga, silikon, magnesium, mangan, nikel, dan sebagainya yang dapat merubah sifat paduan aluminium [1].

Penggunaan aluminium sangat berkembang pesat terutama pada industri pesawat terbang dan otomotif. Masih banyak pengembangan yang dilakukan sehingga dapat menciptakan paduan aluminium baru yang memiliki sifat dan karakteristik yang berbeda. Tabel 1. menunjukkan sifat fisik dari aluminium murni secara detail [2].

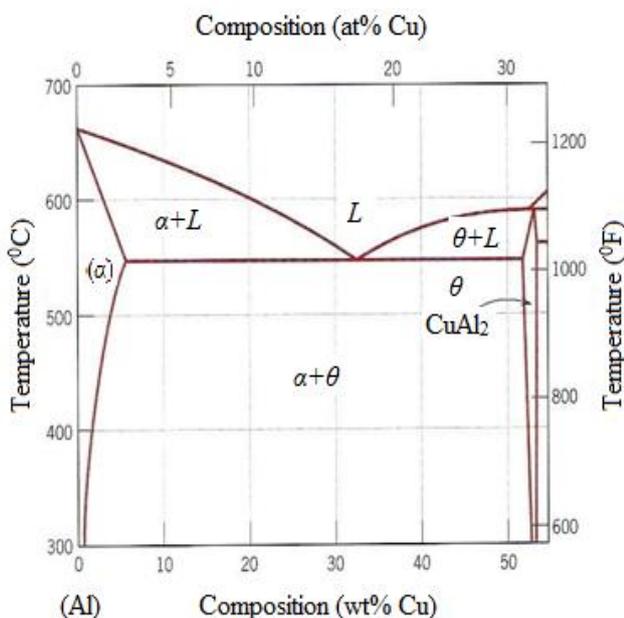
Tabel 1. Sifat fisik dari aluminium murni [2]

Sifat-sifat	Kemurnian Aluminium (%)	
	99,996	>99,0

Massa jenis (20 ⁰ C)	2,6968	2,71
Titik lebur	660,2	653-657
Panas jenis (cal/g . 0C) (100 ⁰ C)	0,2226	0,2297
Tahanan listrik(%)	64,94	59
Hantaran listrik koefisien temperature (⁰ C)	0,00429	0,0115
Koefisien pemuaian (20 - 100 ⁰ C)	23,86x10 ⁻⁶	23,5x10 ⁻⁶
Jenis Kristal, konstanta kisi	fcc,a=4,013 kX	fcc,a=4,04 kX

Catatan : fcc ; face centered cubic = kubus berpusat muka

Adanya unsur Tembaga (Cu) pada paduan Aluminium akan mempengaruhi tingkat kekerasan. Atom dari tembaga akan terdifusi pada sel satuan dari aluminium apabila dipanaskan hingga temperatur *solvus* (padat terlarut) hingga membentuk satu fasa yaitu aluminium- α . Apabila paduan tersebut didinginkan secara cepat maka unsur tembaga akan terdifusi pada sel satuan aluminium sehingga tidak memiliki waktu untuk membentuk fasa baru (β) pada paduan. Kondisi tersebut sering disebut *super saturated solid solution* α yang merupakan fasa tidak stabil. Berawal dari kondisi tersebut, akan tumbuh presipitat. Gambar 1. berikut merupakan diagram fasa Al-Cu dimana terdapat garis *solvus* yang membatasi terbentuknya fasa tunggal (α) pada paduan sehingga dapat meningkatkan kekerasan [3].



Gambar 1. Diagram Fasa Al-Cu [3]

Secara sederhana bahan komposit berarti bahan gabungan dari dua atau lebih bahan yang berlainan. Jadi komposit adalah suatu bahan yang merupakan gabungan

atau campuran dari dua material atau lebih pada skala makroskopis untuk membentuk material ketiga yang lebih bermanfaat. Komposit dan paduan memiliki perbedaan dari cara penggabungannya yaitu apabila komposit digabung secara makroskopis sehingga masih kelihatan serat maupun matriknya (komposit serat) sedangkan pada paduan digabung secara mikroskopis sehingga tidak kelihatan lagi unsur-unsur pendukungnya [4]. Komposit dibentuk dari dua jenis material yang berbeda, yaitu [5] :

1. Penguat (*reinforcement*).

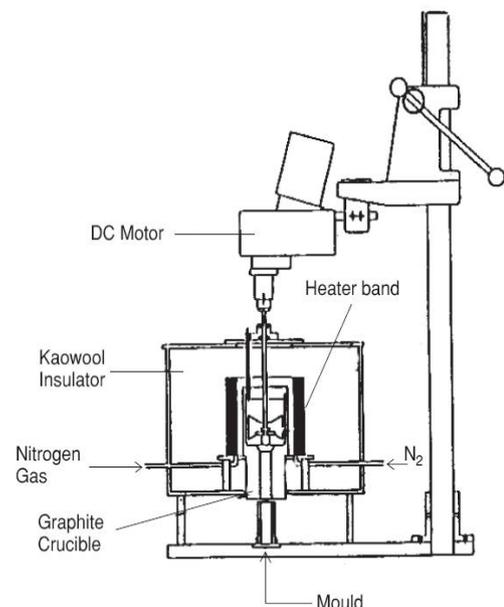
Penguat atau *reinforcement* mempunyai sifat kurang *ductile* tetapi lebih *rigid* serta lebih kuat.

2. Matriks.

Matriks adalah fasa dalam komposit yang mempunyai bagian atau fraksi volume terbesar (dominan). Matriks mempunyai fungsi sebagai berikut:

- Mentransfer tegangan ke serat.
- Membentuk ikatan koheren, permukaan matrik/serat.
- Tetap stabil setelah proses manufaktur
- Melindungi serat.

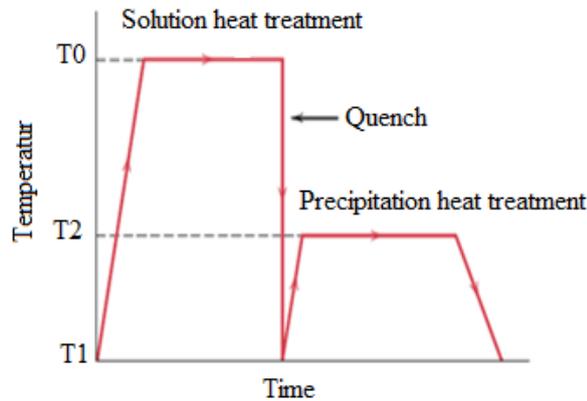
Proses *Stir casting* adalah proses pengecoran dengan cara menambahkan suatu logam murni (biasanya aluminium) dengan sebuah komposit dengan cara melebur logam murni tersebut kemudian logam murni yang sudah mencair tersebut diaduk secara terus menerus hingga terbentuk sebuah pusran, kemudian komposit (berupa serbuk) tersebut dicampurkan sedikit demi sedikit melalui tepi dari pusran yang telah terbentuk itu. Skema dari proses stir casting dilihat pada Gambar 2 [6].



Gambar 2. Skema dapur pleburan stir casting [6]

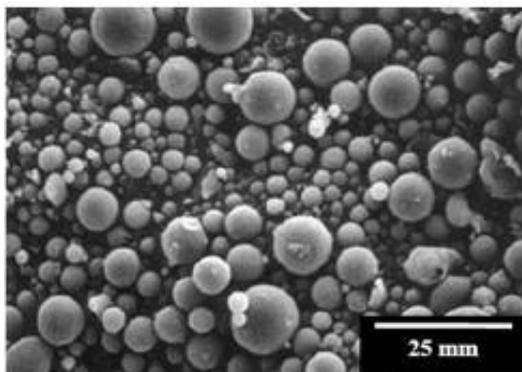
Pada pengerasan paduan aluminium dengan cara *age hardening* sangat erat hubungannya dengan waktu penahanan atau *holding time* pada saat penuaan. Efek dari penuaan akan mengalami kenaikan pada titik tertentu dan akan mengalami penurunan setelah titik maksimum atau disebut *overaging*. Sehingga dalam

melakukan pengerasan pada aluminium memerlukan metode yang tepat sehingga menghasilkan kekerasan yang optimum [3],[7].



Gambar 3. Hubungan temperatur dengan waktu pada proses presipitasi [3]

Fly ash merupakan material yang memiliki ukuran butiran yang halus, berwarna keabu-abuan dan diperoleh dari hasil pembakaran batubara. Tipe dan kandungan mineral di dalam batubara, suhu dari pembakaran batubara, jenis tungku pembakaran, proses pembakaran seperti perbandingan bahan bakar dan udara, cara pengumpulan dan penyimpanan *fly ash* sebelum digunakan, menyebabkan *fly ash* yang dihasilkan dari suatu *power plant* pada satu daerah dengan daerah lainnya berbeda. Jadi tidak semua *fly ash* menguntungkan dan dapat digunakan sebagai campuran. Komponen terbesar yang terkandung dalam *fly ash* adalah silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), oksida kalsium (CaO) dan oksida besi (Fe_2O_3). *Fly ash* banyak digunakan secara luas sebagai campuran *portland cement*, *concrete* dan material-material khusus lainnya. Densitas *fly ash* adalah $4,8 \text{ g/cm}^3$. Densitas tersebut tergantung dari unsur kimia dan porositas yang terjadi di dalamnya. Bentuk partikel dan sifat permukaan berbagai macam *fly ash* diamati dengan menggunakan *scanning electron microscope (SEM)*. Gambar 4 berikut menunjukkan mikrografi dari partikel *fly ash* [8].



Gambar 4. Partikel *Fly Ash* [9]

METODOLOGI PENELITIAN

Persiapan Alat dan Bahan

Adapun alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Stir Cast

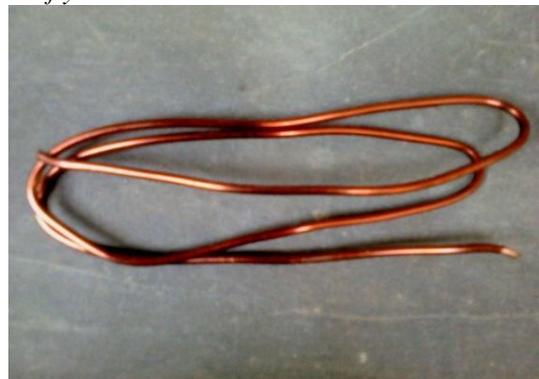


Gambar 5. Stir Cast

2. Tungku krusibel dan *burner*
3. Kowi
4. *Permanent Mold* / cetakan coran
5. Timbangan
6. Gergaji
7. *Furnace Chamber*
8. *Sieving* / ayakan
9. Mesin amplas dan poles
10. *Rockwell hardness tester type 150-A*
11. Media *Quenching*
12. *Thermocouple* dan *display*

Persiapan Bahan

Adapun bahan yang digunakan adalah aluminium bekas, tembaga yang diambil dari potongan kawat tembaga dan serbuk *fly ash*.



Gambar 6. Kawat Tembaga



Gambar 7. Serbuk *Fly Ash*

Proses Pengecoran

Langkah – langkah dilakukan selama proses pengecoran yaitu:

1. Proses penimbangan

a. Penimbangan aluminium

Sebelum dicor aluminium dipotong kurang lebih 15 cm, kemudian ditimbang sesuai kebutuhan pengecoran. Paduan aluminium dengan 4% tembaga yang dibuat ditambahkan dengan persentase *fly ash* 5%, 10%, 15%. Sehingga perhitungan adalah sebagai berikut:

Berat total coran yang diinginkan untuk sekali pengecoran adalah 1000 gr. Dengan massa aluminium adalah 1000 gr. Asumsi kerak yang terjadi saat pengecoran adalah 30%. Kebutuhan aluminium + kerak = 1000 gr + (30% x 1000 gr) = 1300 gr

Massa aluminium yang akan digunakan :

I. 91 % x 1300 gr = 1183 gr

II. 86 % x 1300 gr = 1118 gr

III. 81 % x 1300 gr = 1053 gr

b. Penimbangan *fly ash*

Berat serbuk *fly ash* I yaitu 5% x berat total aluminium = 5% x 1000 gr = 50 gr.

Berat serbuk *fly ash* II yaitu 10% x berat total aluminium = 10% x 1000 gr = 100 gr.

Berat serbuk *fly ash* III yaitu 15% x berat total aluminium = 15% x 1000 gr = 150 gr.

c. Penimbangan tembaga

Tembaga yang diperlukan adalah 4% dari berat aluminium, yaitu sebesar 40 gr.

2. Proses peleburan

Aluminium yang sudah ditimbang sesuai massa di atas dimasukkan ke dalam kowi, dan kowi dimasukkan ke dalam tungku krusibel. *Burner* pada tungku dinyalakan dan kowi ditutup.

3. Pengadukan (*stir cast*)

Setelah Aluminium mencair pada suhu 660°C, dimasukkan tembaga terlebih dahulu kedalam aluminium yang sudah mencair, kemudian hidupkan pengaduk, tuang secara perlahan serbuk *fly ash* tepat ditepian pusran sesuai dengan variasi komposisi serbuk *fly ash* 5%, 10% dan 15% yang ditimbang selama 5 menit pengadukan, agar serbuk *fly ash* tercampur dan tidak banyak yang mengendap. Setelah itu siap untuk dituang ke dalam cetakan.

4. Penuangan dan pengepresan

Sebelum penuangan cetakan dipanaskan sampai suhu tertentu. Temperatur penuangan yang digunakan adalah 700°C. Proses penuangan dilakukan dengan cepat dan berhati-hati untuk menghindari terjadi pembekuan setelah kowi diangkat dari tungku, setelah dituang ke dalam cetakan dipres menggunakan alat pres dengan maksud untuk meminimalisir porositas. Tetapi pada saat pengepresan menemui kendala yaitu aluminium cepat sekali membeku.

5. Pendinginan

Setelah dituang di dalam cetakan tunggu sampai 30 menit. Setelah itu cetakan di buka, biarkan hasil coran menjadi dingin.



Gambar 8. Spesimen Hasil Pengecoran

6. Pemotongan spesimen

Dilakukan pemotongan spesimen menjadi 3 di bagian atas, tengah dan bawah setiap spesimen paduan aluminium tembaga dan *fly ash* dengan prosentase berat 5%, 10% dan 15% untuk pengujian perlakuan panas dengan temperature 180°C dan *holding time* yang berbeda. Kemudian spesimen tersebut akan dilanjutkan pada pengujian kekerasan. Berikut ini merupakan hasil potongan spesimen.



Gambar 9. Spesimen Hasil Pemotongan

Langkah Pengujian spesimen sebagai berikut.

1. Pengujian *age hardening*.

Proses *age hardening* secara keseluruhan dilakukan di Laboratorium Metalurgi Fisik Teknik Mesin Universitas Diponegoro. Proses ini terdiri dari tiga tahap, tahap pertama yaitu proses homogenisasi paduan, dengan menahan spesimen pada temperatur *solution treatment* menggunakan tungku *Hofmann Furnace Chamber* tipe K. Kemudian dilanjutkan proses *quenching* untuk mendapatkan kondisi *super saturated solid solution a* yang bersifat tidak stabil. Dan proses terakhir adalah *artificial aging* yang dilakukan dengan cara menahan kembali spesimen pada temperatur dan *holding time* yang bervariasi. Berikut ini merupakan langkah-langkah pada pengujian *age hardening*.

a. Meletakkan spesimen yang akan diuji pada ruang pembakaran *Hofmann furnace chamber*, kemudian menutupnya dengan rapat.

b. Menghidupkan mesin, kemudian melakukan pengaturan program pada *furnace* dengan mengatur temperatur pembakaran sebesar

520°C dan waktu penahanan selama 720 menit (12 jam).

- c. Menekan tombol penguncian program, kemudian menjalankan program.
 - d. Mempersiapkan media *quenching* sebelum membuka *furnace*.
 - e. Setelah program selesai, segera mengambil spesimen dalam tunggu untuk dicelupkan kedalam air, sehingga terjadi proses pendinginan.
 - f. Setelah 5 menit, ambil spesimen.
 - g. Melakukan proses *artificial aging* pada *furnace* dengan temperatur 180°C, serta variasi waktu penahanan 1 jam, 2 jam, dan 4 jam.
 - h. Spesimen yang telah melalui proses *artificial aging* kemudian akan diuji kekerasannya.
2. Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan di Laboratorium Metalurgi Fisik Teknik Mesin Universitas Diponegoro. Metode yang digunakan dalam pengujian kekerasan ini adalah dengan metode lekukan dengan menggunakan alat *Rockwell Hardness Tester Model HR 150-A*. Skala yang digunakan dalam pengujian ini adalah skala B (HRB). Beban minor pada pengujian ini sebesar 10 kgf sedang untuk beban mayor adalah 100 kgf. Penetrator yang digunakan adalah jenis bola baja 1/16" (*steel ball*). Berikut ini merupakan langkah-langkah yang dilakukan selama proses pengujian kekerasan [10],[11].

- a. Menyiapkan alat dan spesimen uji.



Gambar 10. Spesimen pengujian kekerasan

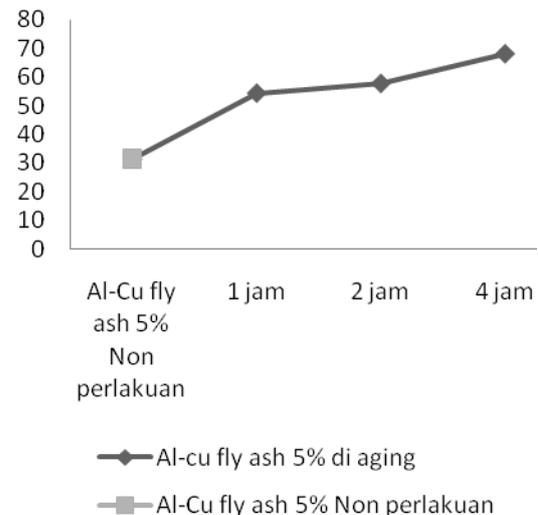
- b. Membersihkan permukaan spesimen, kemudian mengamplas permukaannya dengan mesin amplas untuk menghasilkan permukaan yang rata dan sejajar. Proses pengamplasan dilakukan dalam kondisi basah yaitu dengan dialiri air untuk mengurangi panas yang terjadi akibat gesekan permukaan amplas dan spesimen.
- c. Setelah permukaan spesimen rata dan sejajar, kemudian langkah selanjutnya yaitu menentukan letak titik pada permukaan spesimen yang akan diuji. Untuk pengujiannya diambil 7 titik pada permukaan spesimen, lalu spesimen diletakkan pada *anvil* mesin *Rockwell*.
- d. Spesimen diberi beban minor dengan cara memutar *handwheel* hingga jarum kecil pada

dial indikator menunjukkan pada titik merah. Nilai beban minor yang diberikan adalah 10 kgf.

- e. Mengatur posisi nol pada dial indikator dengan mengatur jarum besar berada di posisi huruf B/C serta mengatur pemberian beban mayor sebesar 100 kgf
- f. Menjalankan mesin *Rockwell* dengan menarik tuas *loading* maka tuas *unloading* akan bergerak. Hal ini menunjukkan bahwa pada tahapan ini, spesimen terkena beban mayor sebesar 100 kgf.
- g. Setelah tuas *unloading* berhenti bergerak, tunggu selama 1 menit agar pembebanan yang diberikan merata.
- h. Setelah 1 menit, mengembalikan tuas *unloading* pada posisi semula.
- i. Mencatat hasil dari skala dial indikator (skala HRB) yang menunjukkan nilai kekerasan pada spesimen tersebut.
- j. Melakukan langkah kerja sebanyak 7 titik yang berbeda

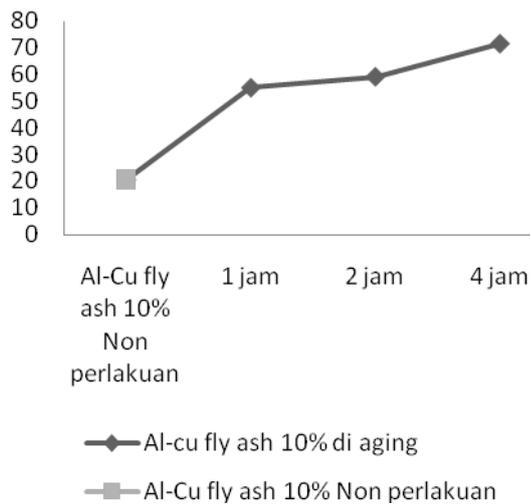
PEMBAHASAN DAN ANALISA

Dari data hasil pengujian kekerasan Al-Cu dengan komposisi *fly Ash* 5%, 10% dan 15% *fly ash* yang telah di *aging* dengan variasi *holding time* yang berbeda dapat disajikan dalam grafik seperti berikut ini.



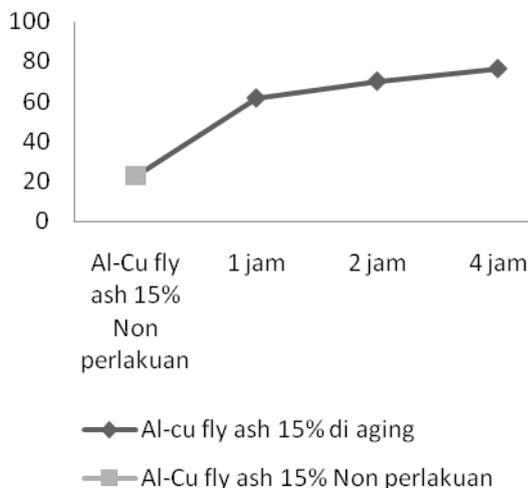
Gambar 11. Grafik Perbandingan Nilai Kekerasan *Rockwell* Al-Cu-*fly ash* 5% terhadap Variasi *Holding Time Aging*

Dari Gambar 11 dapat terlihat bahwa semakin lama *holding time aging* maka nilai kekerasannya semakin meningkat. Untuk *holding time aging* 1 jam nilai kekerasannya meningkat sebesar 54,33 HRB, *holding time aging* 2 jam kekerasannya meningkat sebesar 57,71 HRB sedangkan *holding time aging* 4 jam kekerasannya meningkat sekitar sebesar 68,02 HRB.



Gambar 12. Grafik Perbandingan Nilai Kekerasan Rockwell Al-Cu-fly ash 10% terhadap Variasi Holding Time Aging

Dari Gambar 12 dapat terlihat bahwa semakin lama *holding time aging* maka nilai kekerasannya semakin meningkat. Untuk *holding time aging* 1 jam nilai kekerasannya meningkat sebesar 55 HRB, *holding time aging* 2 jam kekerasannya meningkat sebesar 59,09 HRB sedangkan *holding time aging* 4 jam kekerasannya meningkat sekitar sebesar 71,42 HRB.



Gambar 13. Grafik Perbandingan Nilai Kekerasan Rockwell Al-Cu-fly ash 15% terhadap Variasi Holding Time Aging

Dari Gambar 13 dapat terlihat bahwa semakin lama *holding time aging* maka nilai kekerasannya semakin meningkat. Untuk *holding time aging* 1 jam nilai kekerasannya meningkat sebesar 61,80 HRB, *holding time aging* 2 jam kekerasannya meningkat sebesar 70,33 HRB sedangkan *holding time aging* 4 jam kekerasannya meningkat sekitar sebesar 76,61 HRB.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan:

1. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan didapatkan perbandingan nilai kekerasan antara komposit Al-Cu *Fly ash* tanpa melalui proses *age hardening* dengan komposit Al-Cu-*Fly ash* yang melalui proses *age hardening*. Pada Al-Cu-5% *Fly ash* tanpa proses *age hardening* didapatkan nilai kekerasan rata-rata yaitu 31,35 HRB sedangkan Al-Cu-5% *Fly ash* dengan proses *age hardening* didapatkan nilai kekerasan rata-rata 54,33 HRB pada *holding time* 1 jam, 57,71 HRB pada *holding time* 2 jam dan 68,02 HRB pada *holding time* 4 jam. Pada Al-Cu-10% *Fly ash* tanpa proses *age hardening* didapatkan nilai kekerasan rata-rata yaitu 20,75 HRB sedangkan Al-Cu-10% *Fly ash* dengan proses *age hardening* didapatkan nilai kekerasan rata-rata 55 HRB pada *holding time* 1 jam, 59,09 HRB pada *holding time* 2 jam dan 71,42 HRB pada *holding time* 4 jam. Pada Al-Cu-15% *Fly ash* tanpa proses *age hardening* didapatkan nilai kekerasan rata-rata yaitu 22,83 HRB sedangkan Al-Cu-15% *Fly ash* dengan proses *age hardening* didapatkan nilai kekerasan rata-rata 61,80 HRB pada *holding time* 1 jam, 70,33 HRB pada *holding time* 2 jam dan 76,61 HRB pada *holding time* 4 jam.
2. Pada proses *age hardening*, *holding time* sangat mempengaruhi nilai kekerasan dari Al-Cu-fly ash. Semakin lama *holding time*, maka kekerasan yang dihasilkan cenderung meningkat. Hal ini dikarenakan pada waktu permulaan aging, Zona GP yang terbentuk terus berkembang baik dari segi ukuran, maupun jumlah seiring dengan bertambahnya waktu *aging*.

Saran:

1. Perlunya pengujian SEM untuk analisa lebih lanjut tentang struktur mikro dari unsur presipitat yang terbentuk pada paduan aluminium.
2. Perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai proses *age hardening* dengan *holding time* yang lebih lama hingga mengalami proses *overaging*, sehingga nantinya akan didapatkan kekerasan optimum di suhu *aging* 180°.

DAFTAR PUSTAKA

1. Totten, George. E, 1999, "*Handbook Of Aluminium*", Volume 1, Marcel Dekker, New York, Bassel.
2. Surdia, Tata dan Shinroku Saito, 1995, "*Pengetahuan Bahan Teknik*", PT. Pradnya Paramita, Jakarta.
3. Callister Jr, William. D, 1994, "*Material Science and Engineering*", 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
4. <http://etd.eprints.ums.ac.id/5941/1/D200020185.pdf>, diakses 28 Februari 2012.
5. <http://lontar.ui.ac.id/file?file=digital/132857-T%2027818Fabrikasi%20kompositTinjauan%20literatur.pdf>. Yang di unduh pada tanggal 3 Agustus 2012.
6. <http://eprints.utm.my/1026/1/JT35A2.pdf>, diakses 14 Agustus 2012.

7. James K. Wessel, 2004, “*Handbook of Advanced Materials*”, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
8. http://eprints.undip.ac.id/7029/1/Sri_Prabandiyani_Retno_Wardani.pdf, diakses 3 Agustus 2012.
9. <http://ejournal.undip.ac.id/index.php/rotasi/article/download/2404/2129>, diakses 3 Agustus 2012.
10. Application Note ASTM E-18-05.
11. Alamsyah, Muhammad Faizin, 2008, **Laporan Praktikum Struktur dan Sifat Material**. Semarang: Universitas Diponegoro.