

# Pengaruh *Milling Time* Terhadap Pembentukan Fasa $\gamma$ -MgAl Hasil *Mechanical Alloying*

Ganive Pangesthiaji dan Hariyati Purwaningsih

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111

E-mail: hariyati@mat-eng.its.ac.id

**Abstrak**—Paduan berbasis magnesium (Mg) merupakan salah satu paduan yang banyak sekali manfaatnya dalam dunia industri. Salah satu manfaatnya dapat digunakan sebagai Hydrogen Storage Material. Baru-baru ini peneliti mengembangkan paduan berbasis magnesium sebagai metal hydride, salah satunya adalah paduan magnesium dengan aluminium (Mg-Al). Dalam penelitian ini metode yang digunakan adalah *mechanical alloying*. Alat yang digunakan adalah *Modification Horizontal Ball Mill*. Alat ini dibuat dengan menggunakan prinsip rotasi secara horizontal untuk proses *milling*-nya. Paduan Mg-Al dengan komposisi Mg-42 at.% Al disintesa melalui proses *milling* dengan variasi waktu 2, 5, 10, dan 20 jam. Serbuk hasil *milling* disintering dengan temperatur 600°C dengan *holding time* selama 2 jam. Pengujian dilakukan dengan menggunakan BET, XRD, SEM-EDX, dan DSC/TGA. Hasil penelitian menunjukkan bahwa paduan  $\gamma$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> telah terbentuk pada pemanasan dengan temperatur 600°C. Hasil XRD juga menunjukkan bahwa paduan membentuk *solid solution* Mg-Al, dimana hal ini diperlihatkan oleh puncak Al yang mengalami pelebaran akibat terlarutnya unsur Mg ke dalam Al begitu juga sebaliknya. Hasil DSC/TGA memperlihatkan reaksi pembentukan paduan  $\gamma$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> terjadi pada temperatur 475,33°C.

**Kata Kunci:** Mg, Al, *Milling Time*, *Mechanical Alloying*

## I. PENDAHULUAN

MAGNESIUM (Mg) merupakan logam paling ringan diantara logam yang biasa dipakai dalam suatu struktur. Akhir-akhir ini telah dikembangkan paduan dari magnesium dalam hal teknologi *fuel cell* (sel bahan bakar). Penelitian tentang sumber energi dari hidrogen difokuskan pada pengembangan *metal hydride* sebagai media penyimpanan hidrogen yang lebih aman, karena sifat hidrogen yang sangat mudah terbakar. Mg merupakan salah satu material yang menjajikan yang dapat digunakan sebagai material *Hydrogen Storage*. Magnesium hydride mampu menyimpan hydrogen sebesar 7,6% wt [1]. Selain itu, hidrida berbasis Mg memiliki sifat yang baik, seperti tahan panas, menyerap getaran, dan reversibilitas [2].

Paduan magnesium yang banyak dikembangkan sebagai *metal hydrid* adalah Mg-Ni, Mg-Al, Mg-Ti, Mg-Fe, Mg-Cr [3]. Salah satu paduan yang banyak dikembangkan adalah paduan magnesium dengan aluminium (Mg-Al). Paduan ini mampu menyerap hidrogen sebesar 3.02% wt hidrogen [4]. Menurut diagram fasa biner Mg-Al terdapat dua fasa paduan yaitu fasa  $\beta$  - Mg<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> dan fasa  $\gamma$  - Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>. Dari penelitian sebelumnya mengenai hidrogenisasi, diantara kedua fasa

tersebut yang mampu mengikat hidrogen lebih banyak adalah fasa  $\gamma$  - Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> [5].

Ada beberapa metode untuk mensintesis magnesium dengan aluminium seperti, *electrodeposition* [6], *bulk mechanical alloying* [7], *arc melting* [8], *induction melting* [9] dan lain-lain. Pada penelitian ini sintesa dilakukan dengan menggunakan metode *mechanical alloying* / pemaduan mekanik dengan menggunakan *ball mill*. Banyak faktor-faktor yang berpengaruh terhadap hasil dari proses *milling* ini seperti, kecepatan, waktu, temperatur, tekanan, ukuran grinding ball, persentase PCA (*process control agent*), dan komposisi berat serbuk tersebut [10]. Pada penelitian ini dipilih variabel *milling time* pada metode *mechanical alloying* terhadap pembentukan fasa  $\gamma$  - Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>. Penelitian sebelumnya oleh Ilham Thias [11] telah dipelajari pengaruh kecepatan penggilingan dan komposisi berat terhadap perubahan fasa dan struktur mikro paduan magnesium dan aluminium. Dari penelitian itu diketahui bahwa dengan mevariasikan kecepatan penggilingan dan komposisi berat belum dapat menghasilkan fasa  $\gamma$  - Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> dengan maksimal. Oleh karena itu dalam penelitian ini diharapkan dengan mevariasikan waktu penggilingan dan penambahan proses sintering didapatkan fasa  $\gamma$  - Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> yang maksimal.

## II. URAIAN PENELITIAN

### A. Bahan

Preparasi awal material menggunakan serbuk Mg (Merck, kemurnian 99,7%), Al (Merck, kemurnian 90%). PCA yang digunakan ketika *milling* adalah ethanol (kemurnian 90%). Gas argon digunakan saat proses pemanasan.

### B. Metode

*Milling* dilakukan dengan menggunakan alat *Modification Horizontal Ball Mill* dengan kecepatan 700rpm. Furnace yang digunakan adalah model *Tube Furnace*. Proses pemanasan dilakukan dalam keadaan vakum dengan dialiri gas argon.

### C. Preparasi Sampel

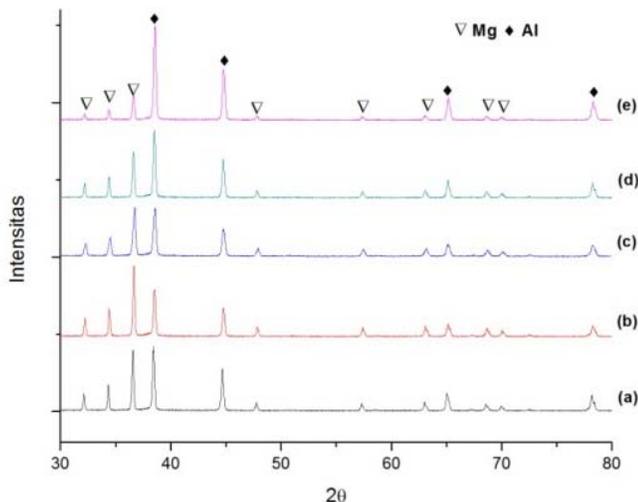
Serbuk Mg dan Al dicampur dengan perbandingan 55% wt dan 45% wt, penambahan PCA berfungsi untuk mengurangi efek *cold welding* ketika *milling*. Penambahan ini dilakukan sebelum serbuk dimilling. Serbuk dimilling dengan kecepatan 700 rpm dan dengan variasi waktu 2, 5, 10, 20 jam. Setelah proses *milling*, serbuk dikeringkan untuk menghilangkan

Tabel 1 Distribusi Ukuran Partikel

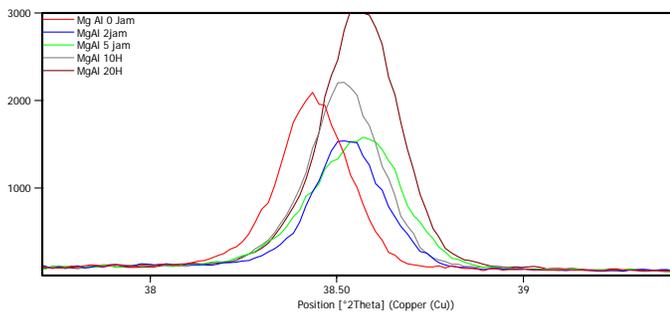
Ukuran Partikel (µm)	Distribusi Ukuran Partikel (%)				
	0 Jam	2 Jam	5 Jam	10 Jam	20 Jam
>55	56	55,4	49,3	45,5	42,6
55-50	17,9	17,3	16,2	16	16
50-45	10,1	11,2	12,8	14,4	14,7
45-40	8,9	9	12,1	13,4	14,8
<40	7,1	7,1	9,6	10,7	11,9

Tabel 2 Hasil Pengujian BET

Milling Time	Surface Area (m <sup>2</sup> /g)
2 Jam	0
5 Jam	9,737
10 Jam	11,326
20 Jam	0



Gambar 1. Hasil Uji XRD Pada serbuk Hasil Milling dengan kecepatan 700rpm : (a) 0 jam, (b) 2 jam, (c) 5 jam, (d) 10 jam, (e) 20 jam



Gambar 2. Puncak Difraksi Al Pada Setiap Variabel Milling Time

ethanol pada serbuk. Proses selanjutnya adalah dilakukan *sintering* dengan temperatur 600°C dan *holding time* selama 2 jam dan dalam lingkungan Argon untuk menghindari terbentuknya oksida pada spesimen.

D. Analisis

Analisa *surface area* pada serbuk hasil milling dilakukan menggunakan BET (Brunauer, Emmett, Teller) dan *Sieving*. Analisa perubahan fasa yang terjadi pada serbuk hasil milling dan *sintering* dikarakterisasi menggunakan XRD *Phillips X'Pert MPD System (X-Ray Diffraction)* dengan *CuKα* sebesar 1.54056 Å dan range sudut sebesar 15°-80°. Hasil

XRD dianalisa dengan menggunakan *software High Score Plus*. Karakterisasi struktur mikro menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*), FEI tipe INSPECT S50. Pengujian DSC/TGA (*Differential Scanning Calorimetry / Thermo Gravimetrik Analysis*) dilakukan pada serbuk dengan *milling time* 20 jam untuk mengetahui temperatur perubahan fasa yang terjadi.

III. DATA DAN PEMBAHASAN

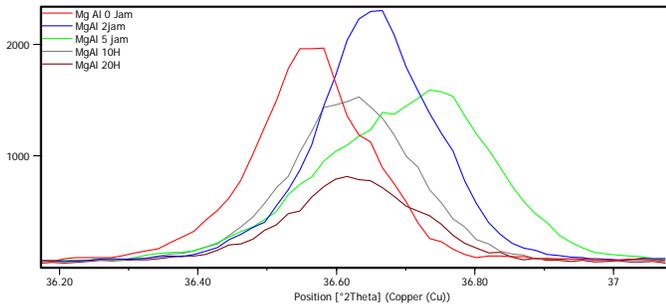
Serbuk hasil *milling* dilakukan pengujian *sieving* untuk mengetahui distribusi partikel yang terdapat pada paduan. Tabel 1 adalah hasil pengujian *sieving* pada spesimen serbuk yang telah di *milling* selama 2, 5, 10, 20 jam. *Milling* yang dilakukan mampu mereduksi ukuran partikel.

Tabel 2 menunjukkan hasil pengujian BET. Dari hasil BET tersebut dapat diketahui bahwa dengan bertambahnya *milling time*, *surface area* pada partikel serbuk bertambah. Dan semakin besar nilai *surface area* semakin kecil ukuran partikel serbuk. Namun pada beberapa variabel *milling time* yaitu 2 dan 20 jam, nilai *surface area* sama dengan nol. Hal ini seperti apa yang dilaporkan Bouaricha [12] dimana paduan dengan komposisi Mg:Al adalah 52:48 at.% mempunyai nilai *surface area* nol.

Gambar 1 adalah hasil pengujian XRD pada serbuk setelah dilakukan *milling*. Untuk serbuk *as-received* yang ditunjukkan oleh grafik (a), terdapat *peak* yang menunjukkan unsur Mg dan Al Pada grafik (b) yaitu pada serbuk dengan *milling time* 2 menunjukkan model yang sama dimana hanya terdapat *peak* untuk Mg dan Al. Bila dilihat secara sepintas terlihat memang tidak terjadi perubahan yang signifikan terhadap puncak difraksi dari unsur Al dan Mg, tetapi sebenarnya bila dilihat dengan detail terjadi pergeseran dan pelebaran kurva pada kedua puncak difraksi Al dan Mg.

Gambar 2 menunjukkan bahwa puncak difraksi Al pada setiap variabel *milling time*. Terdapat pergeseran kurva dan pelebaran kurva yang dimiliki Al yang semula terdapat pada  $2\theta = 38,4892^\circ$ . Pelebaran puncak difraksi ini mengindikasikan terjadi perubahan struktur kristal yang dimiliki Al akibat dari pembentukan fasa baru yaitu Al *solid solution* Mg atau bisa juga disebut Al(Mg). Mg yang terlarut pada Al mengakibatkan struktur kristal yang dimiliki Al semakin *amorf*. Hasil ini sama dengan yang telah dilaporkan Scudino [13] yang mengatakan bahwa hasil *mechanical milling* yang dilakukan pada Al-Mg dengan variasi komposisi dan di *milling* dengan menggunakan Retsch PM400 dengan kecepatan 150rpm hanya menghasilkan sebuah fasa *solid solution* Al(Mg). Melebarnya puncak difraksi Al ini menandakan bahwa terbentuk fasa *solid solution* Al(Mg)<sub>ss</sub> dimana unsur Mg larut dalam Al.

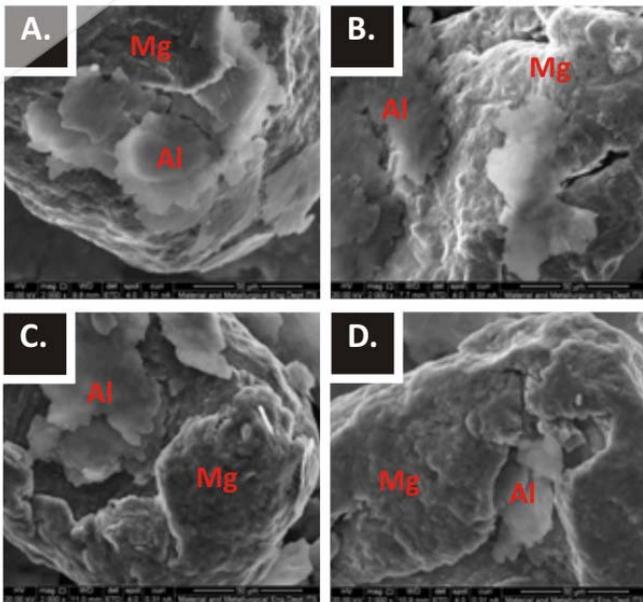
Gambar 3 menunjukkan analisa *single peak* unsur Mg yang terdapat pada  $2\theta = 36,620^\circ$ . Dapat dilihat puncak difraksi yang dimiliki oleh Mg semakin melebar dan intensitasnya juga semakin berkurang seiring dengan penambahan *milling time*. Hal ini mengindikasikan semakin lama *milling* dilakukan maka juga telah terjadi perubahan struktur kristal pada unsur



Gambar 3. Puncak Difraksi Mg Pada Setiap Variabel Milling Time

Tabel 3. Analisa Data XRD Hasil Mechanical Alloying.

Sampel	Fasa	D (nm)
As-Received	Mg	47,699
	Al	39,821
2 jam	Mg	48,538
	Al	41,987
5 jam	Mg	31,173
	Al	30,559
10 jam	Mg	42,868
	Al	38,268
20 jam	Mg	40,819
	Al	36,962



Gambar 4. Hasil Uji SEM Dengan Perbesaran 2000X Serbuk Setelah Dilakukan Proses Milling a). 2 Jam, b). 5 Jam c). 10 Jam d). 20 Jam.

Mg. Hal ini juga mengindikasikan telah terbentuk *solid solution* Mg(Al) dimana kali ini Al larut di dalam Mg.

Pada Tabel 3 menunjukkan analisa data XRD serbuk hasil *milling*. Berdasarkan Tabel 3 pada kolom FWHM untuk masing-masing fasa Mg dan Al menunjukkan perubahan. Perubahan ini mengindikasikan adanya perubahan struktur kristal unsur Mg dan Al pada proses *mechanical alloying* seiring dengan lamanya *milling time*. Perubahan struktur kristal pada unsur Mg dan Al ini yang menunjukkan perubahan fasa Mg dan Al yang telah berubah menjadi *solid solution* Mg-Al. Hal ini sama seperti yang dilaporkan Gubicza

[14] pada yang menyatakan bahwa hasil XRD yang dilakukan pada paduan Al-6wt.% Mg yang di *milling* menggunakan SPEX8000 *shaker miller* menunjukkan semakin lama *milling* dilakukan intensitas puncak difraksi Mg semakin berkurang dan semakin banyak konsentrasi Mg yang ada pada *solid solution* Al(Mg)<sub>ss</sub>.

Ukuran kristal dari setiap unsur yang ada pada ke empat sampel dapat dihitung secara teoritikal. Pengukuran kristal dihitung sesuai dengan rumus Debye Scherrer pada persamaan 1 sebagai berikut.

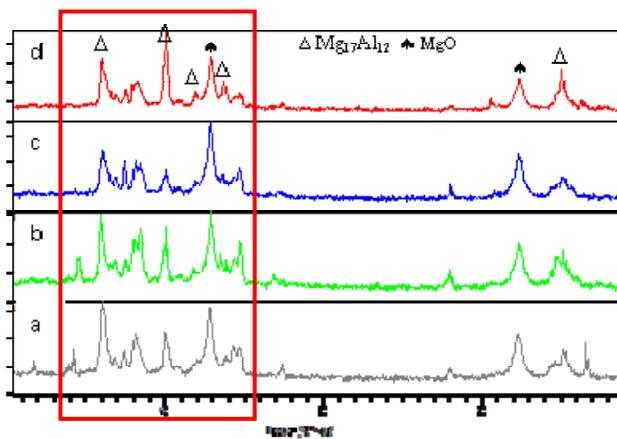
$$D = \frac{0,9\lambda}{B \cos \theta} \dots \dots \dots (1)$$

Dimana D adalah ukuran kristal (nm), λ adalah panjang gelombang yang digunakan dalam pengujian XRD yaitu 1.54056 Å, B adalah lebar setengah puncak (FWHM) dalam radian, dan θ adalah posisi sudut terbentuknya puncak. Hasil tersebut menunjukkan terjadinya perubahan struktur kristal yang terjadi pada proses *mechanical alloying* seiring dengan lamanya *milling time*. Perubahan struktur kristal pada unsur Mg dan Al ini yang menunjukkan perubahan fasa Mg dan Al yang telah berubah menjadi *solid solution* Mg-Al [15], [16].

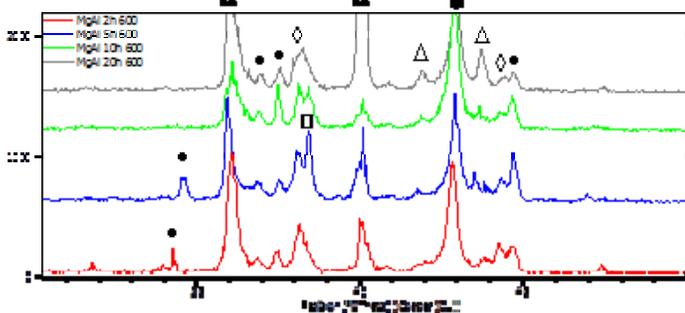
Dari analisa ukuran kristal di atas terlihat bahwa semakin lama *milling time* yang dilakukan semakin kecil ukuran kristal dari masing-masing unsur. Dapat dilihat bahwa untuk unsur Mg semakin lama *milling time* ukuran kristalnya cenderung semakin kecil, begitu juga halnya yang terjadi pada unsur Al. Hal ini menunjukkan proses *mechanical alloying* dengan menggunakan *Modification Horizontal Ball Mill* efektif untuk mereduksi ukuran kristal pada paduan Mg dan Al. Hal tersebut sama seperti yang dikatakan Suwarno dan Adi [16] bahwa hasil penghitungan ukuran kristal dari paduan MgAl dengan perbandingan stokiometri unsur Mg : Al = 2 : 3 yang di *milling* dengan menggunakan HEM SPEX 8000 dengan variasi waktu menunjukkan ukuran kristalit unsur Mg dan Al berkurang seiring dengan penambahan waktu sedangkan ukuran kristal dari Mg<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> semakin besar. Ukuran kristalit yang semakin kecil ditandai dengan puncak difraksi dari unsur Mg dan Al tampak semakin *amorf*.

Dari Gambar 4 merupakan hasil uji SEM pada serbuk hasil *milling*. Dapat dilihat unsur Mg yang berbentuk *spherical* atau bulat mulai diselimuti unsur Al yang memiliki bentuk *flake* atau pipih. Hal ini dapat dikatakan *mechanical milling* yang dilakukan pada paduan magnesium dan aluminium hanya membentuk fasa *solid solution* Mg - Al. Untuk distribusi dari *solid solution* Mg - Al itu sendiri terlihat beberapa unsur Mg dan Al yang membentuk *solid solution*. Terlihat pada gambar masih terdapat unsur Mg dan Al yang masih terpisah dan tidak membentuk paduan *solid solution*.

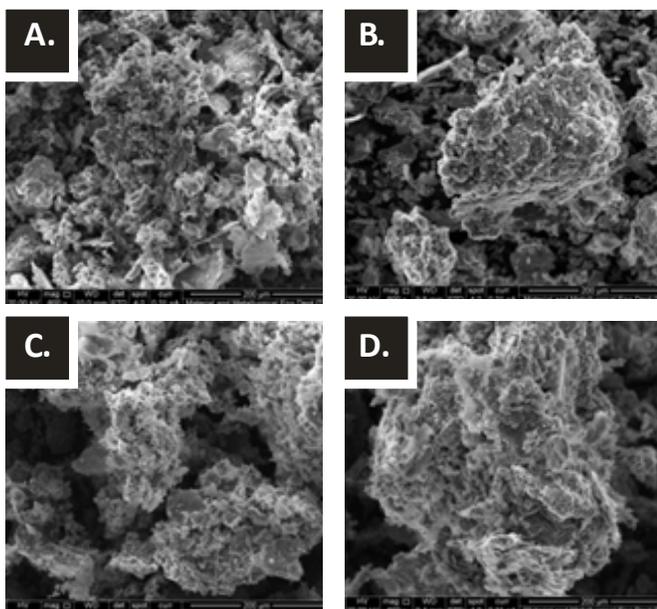
Dari hasil uji XRD pada Gambar 5 dapat dilihat bahwa fasa γ-Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> dapat terbentuk pada setiap variabel setelah *sintering* dilakukan pada temperatur 600°C. Hasil analisa menggunakan *software High Score Plus* didapatkan beberapa fasa lain yaitu fasa Mg<sub>28</sub>Al<sub>45</sub> dan fasa (Al<sub>37</sub>Mg<sub>3</sub>)<sub>0.1</sub>. Kedua fasa ini diindikasikan sebagai fasa metastabil. Perbesaran yang dilakukan pada 2θ 30 - 50° terlihat puncak difraksi fasa



Gambar 5. Hasil Uji XRD Sintering 600°C Pada Serbuk dengan Milling Time: a) 2 Jam, b) 5 Jam, c) 10 Jam, d) 20 Jam.



Gambar 6. Hasil Perbesaran Daerah Yang Berada Di Dalam Kotak Merah Gambar 5.



Gambar 7. Hasil Uji SEM Sintering 600°C Dengan Perbesaran 600X Pada Serbuk Dengan Milling Time a). 2 Jam, b). 5 Jam c). 10 Jam d). 20 Jam

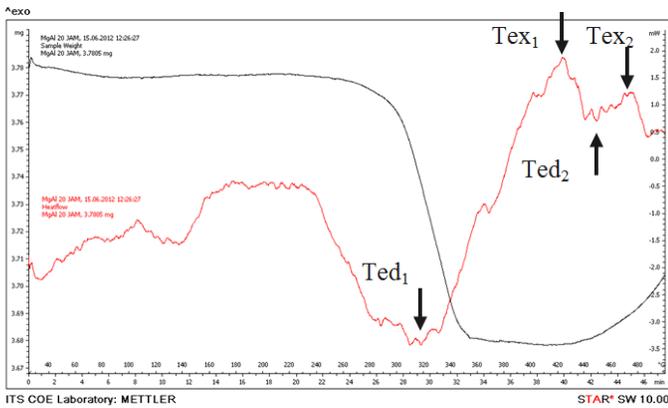
metastabil ini berada disekitar puncak difraksi fasa Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>. Gambar 6 menunjukkan perbesaran daerah yang berada didalam kotak merah.

Pada Gambar 7 dapat diketahui bahwa unsur Mg dan Al telah membentuk paduan baru yaitu Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> seperti yang diperlihatkan pada gambar tersebut. Dari gambar diatas dapat dilihat bentuk butiran dari Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> terlihat seperti butiran-butiran kecil yang menggumpal. Serbuk ini terlihat mengalami aglomerasi bila dibandingkan dengan serbuk dengan sintering 400°C. Crivello [17], menyatakan bahwa pada komposisi ideal untuk membentuk Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> yaitu Mg – 41,38 at. % Al hasil SEM menunjukkan distribusi homogenitas aglomerasi yang terjadi pada saat pembentukan Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> lebih baik bila dibandingkan terhadap paduan dengan komposisi Mg-30 at. % Al.

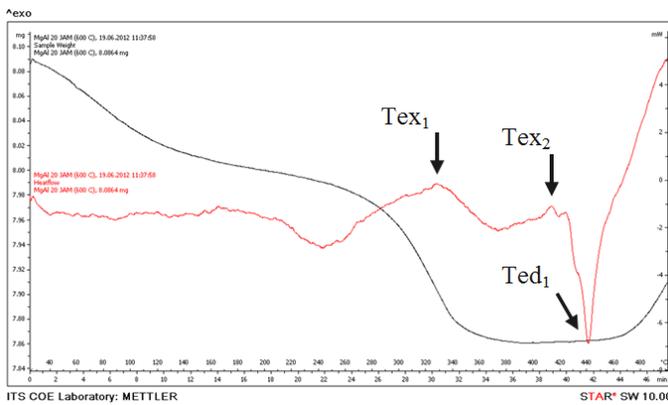
Pada Gambar 8 dapat diketahui puncak endothermik pertama yang ditandai dengan  $T_{ed1}$  menunjukkan terjadinya pemisahan *solid solution* Al(Mg) yang terjadi pada temperatur 317,83°C. Kemudian dilanjutkan dengan proses rekristalisasi yang terjadi pada puncak yang ditandai dengan  $T_{ex1}$  dengan temperatur 423,83°C. Pada puncak  $T_{ex1}$  ini di indikasi terbentuk sebuah fasa metastabil Mg-Al dimana fasa metastabil ini masih bisa berubah menjadi fasa yang lebih stabil. Pada puncak endothermik yang kedua yaitu pada temperatur 449,50°C terjadi *melting* pada fasa metastabil yang terbentuk. Kemudian pada puncak eksotermik yang kedua dengan temperatur 475,33°C terjadi pembentukan  $\gamma$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> yang stabil. Data diatas sesuai dengan yang dilaporkan oleh Scudino [13] yang menyatakan bahwa hasil DSC yang dilakukan pada hasil *mechanical milling* Al<sub>60</sub>Mg<sub>40</sub> dengan temperatur 0-700K menunjukkan terdapat puncak eksotermik pada temperatur 470 K, 550 K dan 670 K. Pada puncak eksotermik pertama 470K mengindikasikan terbentuk *solid solution* Al(Mg). Kemudian pada puncak eksotermik kedua 550K terbentuk fasa metastabil Al-Mg. Untuk puncak eksotermik ketiga 703K menunjukkan tidak terdapat lagi Al(Mg) dan fasa metastabil yang terbentuk melainkan fasa stabil Al<sub>2</sub>Mg<sub>3</sub>.

Pada Gambar 9 dapat diketahui puncak eksotermik pertama yaitu  $T_{ex1}$  menunjukkan bahwa terjadi pembentukan fasa metastabil Mg-Al yang terjadi pada temperatur 328,33°C. Kemudian pada puncak eksotermik kedua yaitu  $T_{ex2}$  dengan temperatur 413,667°C terbentuk fase tunggal  $\gamma$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>. Pada puncak ini sepenuhnya Mg dan Al membentuk fase  $\gamma$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>. Fase ini mengalami *melting* pada temperatur 441,33°C yang ditunjukkan oleh  $T_{ed1}$ . Data tersebut sesuai dengan Crivello [17], yang mengatakan bahwa hasil DSC pada paduan Mg-Al 58,62 at. % Mg yang telah dipanaskan pada temperatur 100°C mengindikasikan pada temperatur 468°C terdapat puncak endothermik yang menunjukkan *melting point* Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>. Yabe dan Kuji [18] juga mengatakan bahwa hasil DSC pada serbuk yang telah terbentuk fasa Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> menunjukkan pada temperatur 380K dan 580K terdapat puncak eksotermik yang mengindikasikan berinteraksinya Mg dengan Al untuk membentuk Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> dan pada temperatur 720K terdapat puncak endothermik dimana hal ini menunjukkan *melting point* dari fasa Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>.

DAFTAR PUSTAKA



Gambar 8. Hasil Pengujian DSC/TGA Pada Serbuk Dengan *Milling Time* 20 Jam. (Ted) dan (Tex) Menunjukkan Temperatur Endothermik dan Eksotermik



Gambar 9. Hasil Pengujian DSC/TGA Pada Serbuk Dengan *Milling Time* 20 Jam dan *Sintering* 600°C. (Ted) dan (Tex) Menunjukkan Temperatur Endothermik dan Eksotermik

IV. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian pembuatan sintesa Mg-Al melalui proses *mechanical alloying* serta karakterisasinya, maka dapat ditarik kesimpulan :

1. Hasil *mechanical alloying* yang dilakukan pada paduan Mg-42at.% Al dengan menggunakan *Modification Horizontal Ball Mill* menghasilkan *solid solution* Mg(Al) dan Al(Mg) dimana hal ini dapat diketahui dari pelebaran kurva XRD yang dimiliki oleh Mg dan Al.
2. Penambahan *milling time* berpengaruh pelebaran kurva puncak difraksi Mg dan Al yang menunjukkan banyaknya *solid solution* yang terbentuk. Lama *milling time* berkorelasi dengan *peak broadening* masing-masing puncak difraksi Mg dan Al.
3. *Milling time* hingga 20 jam dapat mereduksi *crystallite size* Mg sebesar 40,819 nm dan *crystallite size* Al sebesar 36,962 nm.
4. Fasa  $\gamma$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> terbentuk setelah serbuk dengan *milling time* 2, 5, 10 dan 20 jam dipanaskan pada temperatur 600°C dan *holding time* selama 2 jam.

- [1] H. Imamura, K. Masanari, M. Kusuhara, H. Katsumoto, T. Sumi, dan Y. Sakata, "High Hydrogen Storage Capacity Of Nanosized Magnesium Synthesized By High Energy Ball-Milling," *Journal Alloys and Compounds*, Vol. 386, No. 1-2 (2005, Jun) 211–216.
- [2] B. Sakintuna, F. Lamari- Darkrim F, dan M. Hirscher, "Metal hydride materials for solid hydrogen storage:a review," *International Journal Hydrogen Energy*, Vol. 32, No. 9 (2009, Jun) 1121–1140.
- [3] I. P. Jai, Chagan Lal, dan Ankur Jain, "Hydrogen Storage in Mg: A Most Promising Material," *International Journal Of Hydrogen Energy*, Vol. 35, No. 10 (2010, Mei) 5133-5144.
- [4] Anders Andreasen, "Hydrogenation Properties of Mg-Al Alloys," *International Journal Of Hydrogen Energy*, Vol. 33, No. 24 (2008, Des.) 7489-7497.
- [5] Crivello JC, Nobuki T, Kato S, Abe M, dan Kuji T, "Hydrogen absorption properties of the gamma-Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> phase and its Al-richer domain," *Journal Alloys and Compounds* (2007) 446:157.
- [6] M. Tanniru, Darlene K. Slattery, F. Ebrahimi, "A Study Of Phase Transformations During The Development Of Pressure-Composition-Isotherms For Electrodeposited Mg-Al Alloy," *International Journal Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 1 (2011, Jan.) 639-647.
- [7] T. Nobuki, Jean Claude Crivello, dan Toshiro Kuji, "Synthesis of Mg-Al Alloys by Bulk Mechanical Alloying (BMA) and Their Hydrogen Solubility," *Materials Transactions*, Vol. 9, No. 11 (2008) 2679-2685.
- [8] A. S. El-Amoush, "An X-Ray Investigation Of Hydrogenated Mg- 30Al Magnesium Alloy," *Journal Alloys and Compounds*, Vol. 441, No. 1-2 (2007, Agt) 278–283.
- [9] Q. A. Zhang dan H. Y. Wu, "Hydriding Behavior Of Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> Compound," *Material Chemistry and Physics*, Vol. 94, No. 1 (2005, Nov.) 69–72.
- [10] C. Suryanarayana, *Mechanical Alloying and Milling*. New York : Marcel Dekker (2003).
- [11] I.T. Aditya, "Pengaruh Variasi Komponen Berat Al dan Kecepatan Milling pada Mechanical Alloying Mg-Al terhadap Perubahan Dasa dan Struktur Mikro," Tugas akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya (2011).
- [12] S. Bouaricha, J. P. Dodelet, D. Guay, J. Huot, S. Boily, dan R. Schulz, "Hydriding Behavior of Mg-Al and Leached Mg-Al Compounds Prepared by High-Energy Ball Milling," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 297, No. 1-2 (2000, Feb.) 282-293.
- [13] S. Scudino, M. Sakaliyska, K. B. Surreddi, dan J. Eckert, "Mechanical Alloying and Mechanical Milling of Al-Mg Alloys," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 483, No. 1-2 (2009, Agt.) 2-7.
- [14] J. Gubicza, M. Kassem, G. Ribarik, dan T. Ungar, "The Microstructure of Mechanical Alloyed Al-Mg Determined by X-Ray Diffraction Peak Profile Analysis," *Materials Science and Engineering: A*, Vol 272, No. 1-2 (2004, Mei) 115-122.
- [15] M. Bououdina dan Z.X. Guo, "Comparative Study of Mechanical Alloying of (Mg+Al) and (Mg+Al+Ni) Mixtures for Hydrogen Storage," *Journal of alloys and Compounds*, Vol. 336, No. 1-2 (2002, Apr.) 222-231.
- [16] H. Suwarno dan Wisnu A. A, "Tinjauan Mikrostruktur, Struktur Kristal, dan Kristalit Pertumbuhan Fasa Mg<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> Hasil Mechanical Alloying," *Urania*, Vol. 15, No.1 (2007, Jan.) 1-60.
- [17] J. C. Crivello, T. Nobuki, dan T. Kuji, "Limit of the Mg-Al  $\gamma$ -phase range by Ball Milling," *Intermetallics*, Vol. 15, No. 11 (2007, Nov.) 1432-1437.
- [18] H. Yabe dan T. Kuji, "Thermal Stability and Hydrogen Absorption/Desorption Properties of Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> Produced by Bulk Mechanical Alloying," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 433, No. 1-2 (2007, Mei) 241-245.