

## MAGNESIUM TERAKTIVASI UNTUK PENYIMPAN ENERGI HIDROGEN

Hadi Suwarno

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN, Serpong

### ABSTRAK

#### MAGNESIUM TERAKTIVASI UNTUK PENYIMPAN ENERGI HIDROGEN.

Hidrogen merupakan sarana ideal untuk media simpan, transpor dan konversi energi dengan tujuan luas untuk pengembangan konsep energi bersih serta bebas emisi. Hidrogen dapat disimpan sebagai *carrier* energi dalam bentuk gas, cair maupun dalam logam padat. Magnesium merupakan kandidat untuk media *on-board storage* hidrogen dalam bentuk padat karena material ini mampu menampung hidrogen sebesar 7,6% berat logam. Pada penelitian sebelumnya, hasil hidriding serbuk magnesium ukuran partikel <0,3 mm dan <60  $\mu\text{m}$  hanya mampu menyerap hidrogen sebesar 0,071% berat logam, karena permukaan partikel logam dipenuhi oleh oksigen. Agar proses hidriding bisa berlangsung dengan baik, logam magnesium ukuran partikel <60  $\mu\text{m}$  diaktivasi dengan mencucinya dengan larutan  $\text{NH}_4\text{F}$  0,15M dalam waktu 1 jam. Proses hidriding serbuk magnesium dilakukan di sebuah alat hidriding yang dapat dioperasikan pada tekanan vakum hingga  $1 \times 10^{-7}$  mbar. Analisis hasil proses hidriding selama 2 siklus menunjukkan bahwa magnesium teraktivasi dengan ukuran <60  $\mu\text{m}$  dapat menyerap hidrogen sebesar 3,82% berat logam pada siklus I dan meningkat menjadi 5,15% berat logam pada siklus II. Waktu serap diperlukan adalah 312 dan 221 detik untuk hidriding siklus I dan II. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daya tampung hidrogen masih rendah kemungkinan karena ukuran partikel logam magnesium bukan nano-partikel.

KATA KUNCI: magnesium teraktivasi, penyimpanan energi hidrogen, *carrier* energi, proses hidriding

### ABSTRACT

**ACTIVATED MAGNESIUM FOR HYDROGEN ENERGY STORAGE.** *Hydrogen is the ideal means of storage, transport and conversion of energy for a comprehensive clean-energy concept because of its free emission. Hydrogen can be stored as an energy carrier in the form of gas, liquid, and in solid. Magnesium is the candidate material for on-board hydrogen storage in the form of solid metal hydride because of its safe and higher volumetric energy density, about 7.6 wt% of the metal. Previous experiment on the hydriding of magnesium with the particle size of <0.3 mm and <60  $\mu\text{m}$  yields very poor hydrogen capacity due to the oxygen existence on the metal surface. To improve the hydrogen sorption properties, the magnesium with the particle size of <60  $\mu\text{m}$  is activated by treating the metal with 0.15M  $\text{NH}_4\text{F}$  solution for 1 hour. The hydriding experiment is conducted in a hydriding system that can be operated at a very high vacuum up to  $1 \times 10^{-7}$  mbar. Analyses on the experimental results of two cycles of hydriding show that the activated magnesium powder with the particle size of <60 mm absorbed hydrogen in the amount of 3.82 wt% of the metal in the first cycle, which increased to 5.15 wt% in the second cycle. The absorption process took respectively 312 and 221 seconds for the first and second cycle of hydriding. Experimental results show that the hydrogen capacity of the current experiment is still low likely due to the particle size of magnesium metal, i.e. it should be nanosize.*

*FREE TERMS activated magnesium, hydrogen energy storage, hydriding system, energy carrier*

## I. PENDAHULUAN

Hidrogen merupakan sarana ideal untuk media simpan, transpor dan konversi energi dengan tujuan luas untuk pengembangan konsep energi bersih serta bebas emisi<sup>[1]</sup>. Hidrogen dapat diproduksi dari berbagai sumber dengan memakai berbagai teknologi. Senyawa-senyawa mengandung hidrogen seperti bahan bakar fosil, biomassa dan air merupakan sumber hidrogen. Proses termokimia dapat digunakan untuk memproduksi hidrogen dari biomassa dan bahan bakar fosil (batubara, minyak bumi dan gas alam)<sup>[2]</sup>. Pembangkit tenaga dari sumber energi matahari, angin dan pusat pembangkit tenaga nuklir juga dapat digunakan untuk memproduksi hidrogen secara elektrolisa<sup>[3,4]</sup>.

Mayoritas hidrogen saat ini diproduksi dari bahan bakar fosil, baik melalui proses *reforming* minyak bumi, gas alam, maupun gasifikasi batubara. Reaktor nuklir merupakan sarana terbaik untuk memproduksi hidrogen secara ekonomis karena tidak menggunakan bahan dasar fosil tetapi dari air yang dipecah (*water splitting*) maupun diproses secara kimia yang dikenal sebagai siklus sulfur-iodida (reaksi Bunsen, disosiasi hidrogen iodida, dan dekomposisi sulfat) dan siklus hibrida<sup>[5]</sup>.

Hidrogen yang diperoleh disimpan sebagai *carrier* energi dalam bentuk gas, cair maupun dalam logam padat. Untuk menyimpan hidrogen dalam bentuk gas diperlukan tekanan yang sangat tinggi, sementara untuk menyimpan dalam bentuk cair diperlukan sistem kriogenik. Hidrogen juga dapat disimpan dalam bentuk padat. Tabel 1 berikut memberikan gambaran cara simpan hidrogen.

Tabel 1. Metode simpan hidrogen setara dengan 3 kg H<sub>2</sub><sup>[6]</sup>

Teknologi	Volume (liter)	Berat (kg)	Densitas (% berat H <sub>2</sub> )
35 MPa (350 bar) <i>compressed</i> H <sub>2</sub>	145	45	6,7
70 MPa (700 bar) <i>compressed</i> H <sub>2</sub>	100	50	6,0
Cairan kriogenik H <sub>2</sub>	90	40	7,5
Padat sebagai MgH <sub>2</sub>	22,7	39,5	7,6

Magnesium merupakan kandidat untuk media *on-board storage* hidrogen dalam bentuk padat karena material ini mampu menampung hidrogen sebesar 7,6% berat logam. Artinya adalah apabila magnesium digunakan sebagai media simpan hidrogen maka diperlukan magnesium seberat 39,5 kg dengan volume sebesar 22,7 liter. Penyimpanan dalam bentuk padat hanya memerlukan teknologi yang sederhana dan lebih murah sehingga cara ini cukup menjanjikan.

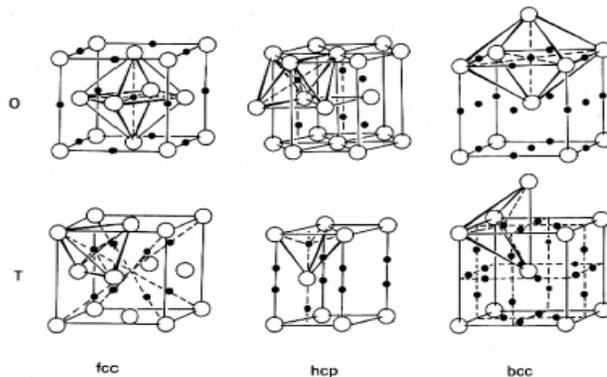
Penulis sebelumnya telah menganalisis sifat penyimpanan hidrogen oleh serbuk magnesium ukuran partikel  $\pm 0,3$  mm dan  $< 60$   $\mu$ m dengan hasil kurang memuaskan karena permukaan partikel logam dipenuhi oleh oksigen<sup>[7]</sup>. Agar proses hidriding bisa berlangsung dengan baik, logam magnesium perlu diaktivasi yaitu dengan mencucinya dengan larutan NH<sub>4</sub>F 0,15M dalam waktu 1 jam. Larutan NH<sub>4</sub>F dibuat dari larutan amonia yang direaksikan dengan asam fluorida sehingga diperoleh NH<sub>4</sub>F konsentrasi 0,15M. Proses penyimpanan hidrogen dilakukan di sebuah alat hidriding yang dirancang oleh Penulis yang dapat dioperasikan pada suhu tinggi dan tekanan vakum hingga  $1 \times 10^{-7}$  mbar. Hasil proses hidriding

magnesium teraktivasi diharapkan akan mampu menyerap hidrogen sesuai dengan kapasitas tampung teoritis sekitar 7,6% berat logam magnesium. Rincian hasil penelitian disajikan dalam makalah ini.

## II. TEORI

Reaksi hidrogen dengan logam bukan merupakan ikatan primer, yaitu ikatan ion, kovalen, maupun ikatan logam yang bisa diklasifikasikan sebagai ikatan yang relatif kuat, tetapi merupakan ikatan sekunder atau ikatan lemah, yaitu ikatan antar atom yang dikelompokkan sebagai gaya *van der Waals*, meskipun sesungguhnya terdapat berbagai mekanisme yang berbeda. Prinsip gas *van der Waals* adalah bahwa orbital valensinya dipenuhi oleh elektron sehingga sangat stabil dan sebagai konsekuensinya tidak dijumpai adanya ikatan primer. Akibatnya atom-atom gas *van der Waals* memiliki daya tarik-menarik yang lemah dan tetap monotonik pada suhu rendah. Inilah alasan mendasar memanfaatkan sifat ikatan logam-hidrogen sebagai *rechargeable energy storage*.

Reaksi hidrogen dengan logam, seperti halnya nitrogen dan karbon, akan membentuk senyawa *interstitial* yaitu seperti larutan padat *interstitial* primer dengan kedudukan atom non-logam dikelilingi oleh atom-atom logam<sup>[8]</sup>. Dikenal ada 2 kedudukan kisi yang diisi oleh atom hidrogen, yaitu sebagai kedudukan tetrahedral dan oktahedral. Gambar 1 memberikan gambaran posisi oktahedral dan tetrahedral dari logam tipe kubus pengarah sisi (*fcc*), heksagonal pengarah ruang (*hcp*), dan kubus pengarah ruang (*bcc*)<sup>[9]</sup>. Untuk menggambarkan kedudukan hidrogen dalam struktur tetrahedral, diambil contoh paduan  $\text{ThZr}_2\text{H}_{7\pm x}$  yang memiliki struktur sama seperti senyawa antar-logam tipe  $\text{MgCu}_2$  (C15) yang membentuk kristal kubus pengarah ruang sebagai grup  $Fd3m$ <sup>[10]</sup>. Hidrogen yang diserap dalam struktur kpr sebagai atom susupan (*interstitial*) mempunyai 3 (tiga) kemungkinan kedudukan yaitu sebagai pusat tetrahedral yang dalam notasi Wyckoff ditulis sebagai posisi *e*, posisi *b* dan posisi *g*. Robert Van Houten dan Stanley Bartram telah memeriksa pembentukan struktur kpr senyawa  $\text{ThZr}_2\text{H}_{7\pm x}$  yang sama dengan senyawa  $\text{MgCu}_2$  (C15) dengan program W. Jeitschko and W. Parthe<sup>[11]</sup>, juga Dieter Ivey and Douglas Nortwood<sup>[12]</sup>. Hasil analisis mereka membuktikan bahwa atom-atom Th, Zr dan H berada pada kisi kisi ruang grup  $Fd3m$  seperti ditunjukkan pada Tabel 2.



Gambar 1. Senyawa *interstitial* dibentuk dari metal tipe kubus pengarah sisi (*fcc*), heksagonal pengarah ruang (*hcp*), dan kubus pengarah pusat (*bcc*)

Tabel 2. Posisi atom hidrogen di pusat tetrahedron dalam struktur kubus pengarah ruang C15 Laves sistem ThZr<sub>2</sub>-H

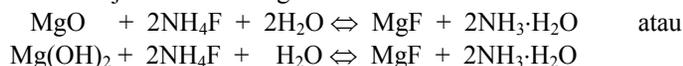
Posisi susupan (Notasi Wyckoff)	Koordinat	Atom tetangga	Pembentuk tetrahedron	Probabilitas jumlah atom H
8b	3/8, 3/8, 3/8	4B	4(32e)	1
32e	x, x, x x = 9/32	1A 3B	1(8b) 3(96g)	4
96g	x, x, z z = 1/8	2A 2B	1(96g) 2(96g)	12

Dari Tabel–2 terlihat bahwa ada 17 atom hidrogen memiliki probabilitas masuk ke dalam struktur *bcc* ThZr<sub>2</sub> ini, yaitu dalam posisi pusat tetrahedral A<sub>2</sub>B<sub>2</sub> ada 12 atom H, posisi pusat tetrahedral AB<sub>3</sub> ada 4 atom H, dan posisi pusat tetrahedral B<sub>4</sub> ada 1 atom H. Robert Van Houten dan Stanley Bartram telah membuktikan bahwa penyerapan maksimum atom hidrogen di dalam struktur *bcc* adalah 6,7 – 7,7 atom H untuk setiap *bcc* dengan posisi atom H yang beragam. Sementara itu, Shoemaker<sup>[13]</sup> dalam penelitian sebelumnya membuktikan bahwa posisi-posisi yang tidak terisi oleh hidrogen akan dibiarkan kosong karena alasan efek elektrostatis. Dari penjelasan ini serta informasi dari Gambar 1, maka dapat dipahami bahwa konsentrasi hidrogen di dalam senyawa ThZr<sub>2</sub>H<sub>7+x</sub> sangat tergantung dari suhu dan tekanan.

Magnesium dalam percobaan ini diharapkan akan menyerap hidrogen dengan reaksi *interstitial* dan mampu menampung hidrogen sebesar 7,6%, seperti halnya yang dihasilkan oleh peneliti lain.

### III. TATA KERJA

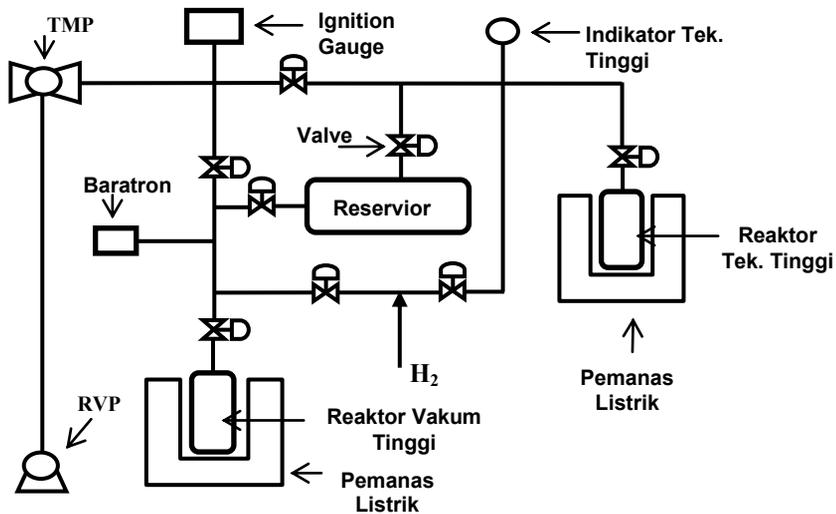
Metode preparasi penelitian adalah sebagai berikut. Pertama, dibuat larutan NH<sub>4</sub>F konsentrasi 0,15M dengan cara mencampur larutan HF dan larutan NH<sub>4</sub>OH. Serbuk magnesium ukuran partikel <60 µm (-270 mesh) disiapkan di dalam gelas beker sebanyak 0,85 g. Proses aktivasi dilakukan sebagai berikut: Larutan NH<sub>4</sub>F 0,15M sebanyak 50 ml dimasukkan ke dalam gelas beker secara perlahan melalui dinding gelas beker. Campuran kemudian dibiarkan selama 1 jam maka akan terjadi reaksi sebagai berikut<sup>[14,15]</sup>:



Dari reaksi tersebut tampak bahwa yang terjadi adalah proses fluorinasi pada permukaan serbuk MgO yang diganti menjadi MgF. Dengan diusirnya oksigen dari permukaan Mg maka proses hidriding bisa berlangsung mudah. Kelebihan ion F<sup>-</sup> dari larutan NH<sub>4</sub>F bisa berfungsi untuk menghasilkan hidrogen yang ditandai dengan terbentuknya gelembung-gelembung kecil di permukaan serbuk dan mudah diamati dengan mata. Maka ion F<sup>-</sup> akan terusir dari permukaan serbuk Mg. Untuk mencegah agar Mg tidak bereaksi membentuk Mg(OH)<sub>2</sub> maka pH larutan dijaga <10. Setelah 1 jam larutan disaring, serbuk dikeringkan dalam mesin pengering pada suhu 70 °C.

Serbuk kemudian dimasukkan ke dalam tabung reaksi untuk proses hidriding. Hidriding dilakukan pada suhu pada suhu 300 °C dengan menggunakan alat hidriding ciptaan sendiri yang secara skematis ditampilkan pada Gambar 2. Hasil hidriding kemudian dianalisis dengan alat difraksi sinar-X (*XRD*) dan *scanning electron micrograph (SEM)*. Proses hidriding

dilakukan 2 siklus, yaitu setelah hidriding Siklus I selesai kemudian dilakukan proses dehidriding dan dilanjutkan dengan proses hidriding Siklus II.



Gambar 2. Skema alat hidriding

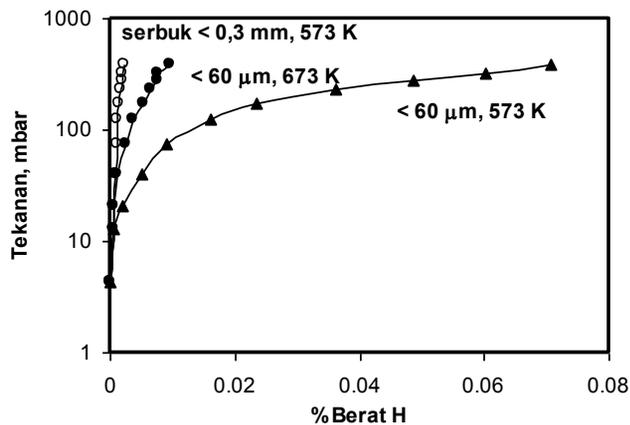
#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 3 menampilkan hasil hidriding serbuk Mg yang diperoleh tanpa proses aktivasi dari percobaan untuk serbuk ukuran  $<60 \mu\text{m}$  dan  $<0,3 \text{ mm}$  pada suhu 573 K dan 673 K. Untuk serbuk Mg dengan ukuran partikel  $<0,3 \text{ mm}$  tidak tampak adanya serapan hidrogen, sedangkan serbuk ukuran  $<60 \mu\text{m}$  pada suhu 573 K lebih banyak menyerap hidrogen dibanding serbuk yang sama dan dihidriding pada suhu 673 K. Pada suhu 673 K serbuk menyerap hidrogen hanya sekitar 0,01% berat, sedangkan pada suhu 573 K menyerap sekitar 0,071% berat sampel. Hasil ini sangat jauh dari 7,6% berat logam seperti yang dihasilkan oleh para peneliti lain<sup>[16-18]</sup>.

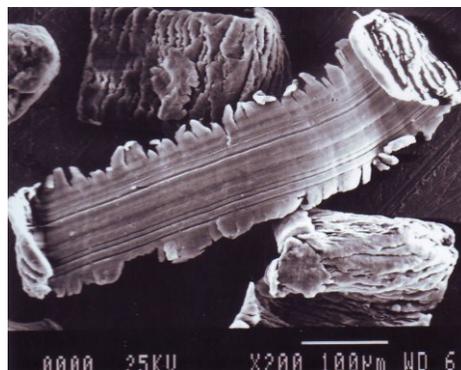
Ukuran sampel percobaan mempengaruhi kinetika proses hidriding. Untuk sampel dengan ukuran  $<0,3 \text{ mm}$  menunjukkan tidak adanya penyerapan hidrogen yang signifikan. Kinetika hidriding sangat tergantung dari bentuk sampel yang digunakan dalam percobaan. Sampel dalam ukuran besar (*bulky*) kurang baik digunakan karena luas permukaan yang terbatas. Hal ini telah dibuktikan hasil uji SEM pada Gambar 4 yang menunjukkan tidak adanya serapan hidrogen dan hampir seluruh partikel masih utuh. Apabila terjadi serapan maka akan ditandai dengan adanya perubahan ukuran partikel menjadi serbuk yang lebih kecil karena adanya sifat *embrittlement* akibat proses hidriding. Hal ini ditunjukkan oleh Gambar 5, hasil SEM setelah proses hidriding, yang memperlihatkan adanya proses pulverisasi. Gambar 5 menunjukkan telah terjadi proses hidriding, dimana fase  $\text{MgH}_2$  yang terbentuk mengakibatkan pulverisasi kemudian diikuti dengan pertumbuhan kristal yang semakin membesar membentuk aglomerisasi. Hasil uji difraksi sinar-X, seperti ditunjukkan pada Gambar 6, juga mendukung tidak adanya serapan hidrogen untuk serbuk berukuran 0,3 mm dan  $<60 \mu\text{m}$  non aktivasi (pada Gambar 6 ditandai *Original*) sedangkan untuk serbuk ukuran  $<60 \mu\text{m}$  teraktivasi (pada

Gambar 6 ditandai  $MgH_2$ ) menunjukkan adanya puncak-puncak baru yang mengindikasikan pembentukan fase  $MgH_2$ . *Fitting* dari puncak-puncak baru yang terbentuk adalah indikasi dari  $MgH_2$ , sama seperti yang diperoleh oleh Saita, dkk<sup>[19]</sup>.

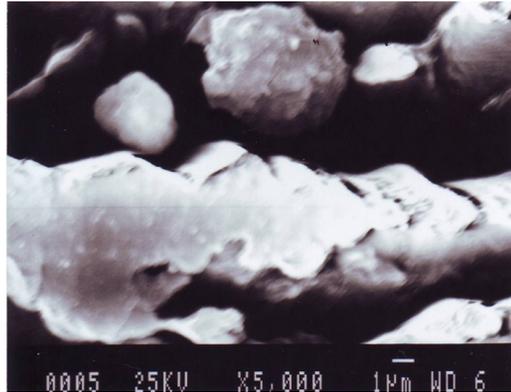
Tidak adanya serapan hidrogen untuk partikel ukuran  $<0,3$  mm dan  $<60$   $\mu m$  disebabkan permukaan partikel yang tidak kondusif untuk proses hidriding. Kecurigaan akibat adanya oksigen adalah yang paling umum terjadi<sup>[16]</sup>, selain itu sedikitnya bidang kontak hidrogen terhadap permukaan serbuk Mg dan terbentuknya senyawa hidrid di permukaan juga akan memblok penyerapan hidrogen.



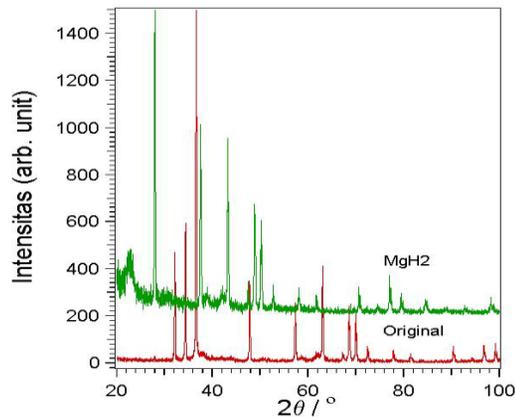
Gambar 3. Penyerapan hidrogen untuk serbuk Mg ukuran  $<0,3$  mm dan  $<60$   $\mu m$  sebelum diaktivasi. Serbuk Mg ukuran  $<60$   $\mu m$  menunjukkan hanya sedikit hidrogen yang terserap<sup>[7]</sup>.



Gambar 4. Hasil uji SEM serbuk Mg ukuran  $<0,3$  mm sebelum diaktivasi yang menunjukkan tidak adanya hidrogen karena tidak ada pulverisasi.



Gambar 5. Hasil uji SEM serbuk Mg ukuran  $<60 \mu\text{m}$  setelah diaktivasi dan dihidriding pada suhu  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  menunjukkan adanya hidrogen karena terjadi pulverisasi.



Gambar 6. Hasil XRD serbuk Mg ukuran  $<60 \mu\text{m}$  sebelum (bawah) dan setelah hidriding (atas) pada suhu  $573 \text{ K}$ .

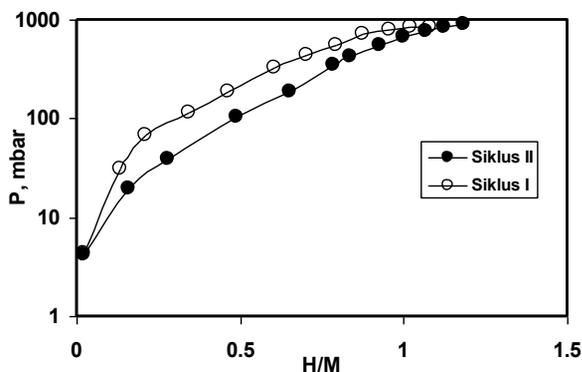
Gambar 7 menyajikan diagram  $P-C-T$  hasil hidriding serbuk Mg setelah dilakukan proses aktivasi dengan menggunakan larutan  $\text{NH}_4\text{F}$   $0,15\text{M}$ . Dari gambar  $P-C-T$  tersebut tampak bahwa proses penyerapan hidrogen berlangsung sangat baik, meskipun hasil tidak sempurna karena tidak semua hidrogen bisa diserap oleh magnesium. Namun hasil ini masih lebih baik dibandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya<sup>[7]</sup>. Ketidaksempurnaan ini menunjukkan bahwa tidak semua struktur kristal Mg bisa disisipi oleh hidrogen, meskipun telah terbukti proses aktivasi mampu menaikkan kapasitas serap hidrogen. Hal ini membuktikan bahwa proses aktivasi dengan larutan  $\text{NH}_4\text{F}$  sangat efektif untuk mengusir pengotor yang menyelimuti permukaan serbuk. Ukuran partikel magnesium yang dipergunakan dalam percobaan ini,  $<60 \mu\text{m}$ , bukan nano partikel, sehingga luas permukaan kontak yang kecil diduga menghambat proses hidriding.

Gambar 8 menampilkan hasil perhitungan rasio berat hidrogen yang diserap oleh magnesium sebesar 3,82% berat logam untuk Siklus I dan meningkat menjadi 5,15% berat logam untuk Siklus II karena luas permukaan serbuk logam menjadi semakin besar. Hasil ini masih di bawah serapan teoritis sebesar 7,6% berat. Namun demikian hasil ini sudah cukup bagus karena proses aktivasi dengan larutan  $\text{NH}_4\text{F}$  relatif mudah dan murah.

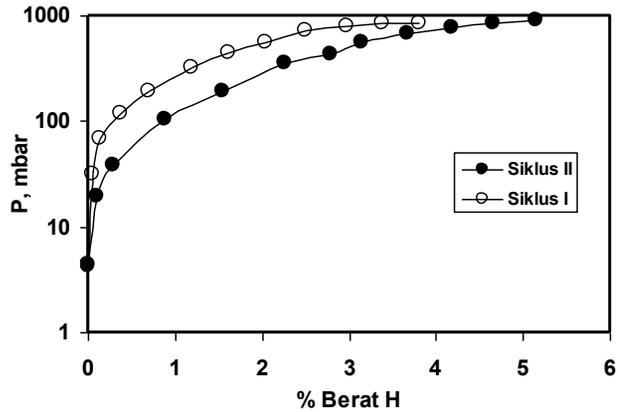
Gambar 9 menampilkan kecepatan proses hidriding. Kecepatan hidriding untuk Siklus I memerlukan waktu 276 detik, sedangkan Siklus II adalah 221 detik. Kecepatan penyerapan Siklus II membuktikan bahwa proses pulverisasi menjadi serbuk dengan ukuran butir lebih halus menyebabkan bertambahnya luas permukaan sehingga daya serap menjadi semakin besar dan waktu yang semakin pendek.

Dibandingkan dengan hasil dari peneliti lain, maka hasil penelitian ini sudah sangat bagus meskipun belum bisa mencapai target penyerapan hidrogen yang diharapkan, yaitu secara teoritis sebesar 7,6% berat. Meskipun demikian hasil penelitian ini menghasilkan waktu hidriding yang lebih cepat dibanding dengan usaha yang dilakukan oleh para peneliti lain yang menggunakan cara berbeda, yaitu dengan menambah katalis atau membuat serbuk nano partikel<sup>[16-18]</sup>. Friedrich, dkk<sup>[20]</sup>, sebagai contoh, dengan menggunakan katalis  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  2% berat dengan proses aniling pada suhu 573 K, mendapatkan kapasitas hidrogen terserap adalah 6,5% berat, namun kecepatan hidriding memerlukan waktu 500 detik. Oelerich, dkk<sup>[21]</sup> memperoleh kapasitas serapan hidrogen hanya 4% berat dengan cara menambahkan 5% katalis yang dirahasiakan dalam waktu sekitar 300 detik.

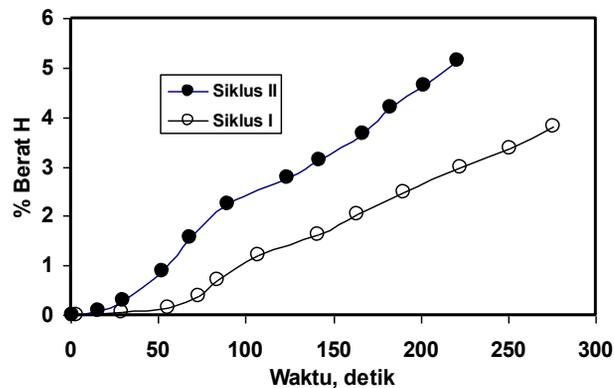
Dari hasil penelitian diperoleh bahwa dengan cara aktivasi secara kimia kapasitas serapan hidrogen 5,15% berat logam Mg sudah cukup memuaskan karena kecepatan reaksi relatif lebih cepat. Diperkirakan apabila siklus proses hidriding-dehidriding diperbanyak, maka proses penyerapan hidrogen akan semakin besar dan waktu semakin pendek. Hasil ini sangat menggembirakan karena langkah awal untuk pemanfaatan hidrogen sebagai *on-board energy storage* telah mendapatkan hasil yang baik dan dalam waktu dekat bisa diaplikasikan sebagai *energy storage*, baik untuk kendaraan transpor maupun listrik pedesaan.



Gambar 7. Diagram  $P$ - $C$ - $T$  proses hidriding serbuk Mg  $<60 \mu\text{m}$  setelah diaktivasi.



Gambar 8. Kecepatan konversi penyerapan hidrogen oleh serbuk Mg teraktivasi menjadi  $MgH_2$ . Hidriding pada Siklus II lebih cepat dan lebih besar dibanding Siklus I.



Gambar 9. Kecepatan penyerapan hidrogen serbuk Mg teraktivasi versus waktu. Hidriding Siklus II lebih cepat dan lebih besar dibanding Siklus I.

## V. KESIMPULAN

Penelitian penyerapan hidrogen oleh logam Mg untuk dipromosikan sebagai *on-board storage* hidrogen telah berhasil dilakukan dengan hasil serapan sebesar 5,15% berat logam Mg untuk ukuran partikel logam Mg  $<60 \mu\text{m}$  (-270 mesh) yang diaktivasi dengan larutan  $NH_4F$ . Kecepatan penyerapan hidrogen sebesar 276 dan 221 detik untuk Siklus I dan Siklus II menunjukkan bahwa metode aktivasi lebih baik dibanding dengan metode penambahan katalis. Apabila siklus hidriding-dehidriding dilakukan berulang kali diperkirakan akan mempercepat proses hidriding. Ukuran partikel serbuk magnesium perlu diperhalus sehingga luas permukaan serbuk menjadi besar.

Penelitian lanjutan dalam bentuk logam magnesium ukuran nano-partikel dan memadu magnesium dengan logam lain berupa nikel, titanium, kromium, aluminium dan besi sedang

dilaksanakan dalam usaha mencari paduan Mg dengan logam lain yang akan menurunkan suhu serta dapat mempertahankan kapasitas serapan hidrogen.

## VI. UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Bapak Menteri Negara Riset dan Teknologi yang telah mendukung penelitian ini melalui Program Insentif Kementerian Negara Riset dan Teknologi tahun 2007. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada PT. BATAN Teknologi yang telah menyediakan fasilitas sehingga penelitian ini bisa dilaksanakan. Tak lupa ucapan terima kasih juga disampaikan kepada semua pihak yang membantu kelancaran penelitian ini, khususnya Bapak Kepala Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir, Bapak Kepala Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir, dan semua staf yang terkait.

## VII. DAFTAR PUSTAKA

1. REILLY, J.J., and SANDROCK, G.D., *Scientific American*, Vol. 242, 1980, p.5118.
2. HUANG, C.P., and RAISSI, A.T., *Journal of Power Sources*, Vol. 163, 2007, pp.637-644.
3. RIIS, T., HAGEN, E.F., VIE, P.J.S., and ULLEBERG, O., “Hydrogen Production and Storage”, IEA Hydrogen Implementing Agreement (HIA), HIA\_HCG\_Production\_2005-03-15\_rev1\_final.doc, IEA Publication, January, 2006.
4. AFGAN, N.H., VEZIROGLU, A., and CARVALHO, M.G., *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 32, 2007, pp.3183-3193.
5. ALLEN, R., and ELDER, R., “Thermochemical Cycles and the Hydrogen Economy”, Department of Chemical and Process Engineering, University of Sheffield.
6. NIEDZWIECKI, A., “Quantum Technologies”, US DOE, Hydrogen Vision Meeting, November, 2001.
7. H. SUWARNO, “Magnesium Hidrid untuk Penyimpan Hidrogen”, Seminar Jaringan Kimia Indonesia, Hotel Mercure, Yogyakarta, 24 Juli, 2008.
8. CHADWICK, G.A., “Metallography of Phase Transformation”, Butterworth & Co. Ltd, London, England, 1992, p.44-46.
9. FUKAI, Y., “In the Metal – Hydrogen System”, Springer Series Materials Science 21, Berlin, 1993.
10. DAAMS, J.L.C., VILLARS, V., and VAN VUCHT, P.J.H.N., “Atlas of Crystal Structure Types for Intermetallic Phases”, Vol. III, ASM International, 1991, p.6871-6872.
11. HOUTEN, R.H., and BARTRAM, S., *Metallurgical Transactions*, Vol. 2, 1971, p.527.
12. IVEY, D., and NORTWOOD, D., *J. Less Common Met*, Vol. 115, 1986, p.23.
13. SHOEMAKER, D.P., and SHOEMAKER, C.B., *J. Less Common Met.*, Vol. 68, 1979, p.43.
14. WANG, X.L., HARAİKAWA, N., and SUDA, S., *J. Alloys Comp.*, Vol. 231, 1995, p.397.
15. YANG, H., YUAN, H., ZHOU, Z., WANG, G., and ZHANG, Y., *J. Alloys Comp.*, Vol. 305, 2000, p.282.
16. ZALUSKA, A., ZALUSKI, L., and STROM-OLSEN, J.O., *J. Alloys Comp.*, Vol. 288, 1999, p.217.
17. BOGDANOVIC, B., BOHMHAMMEL, K., CHRIST, B., REISER, A., SCHLICHTE, K., VEHLEN, R., and WOLF, U., *J. Alloys Comp.*, Vol. 282, 1999, p.84.
18. VARIN, R.A., CZUJKO, T., WASMUND, E.B., and WRONSKI, Z.S., *J. Alloys Comp.*, Vol. 446-447, 2007, p.63.

19. SAITA, I., TOSHIMA, T., TANDA, S., and AKIYAMA, T., *J. Alloys Comp.*, Vol. 446-447, 2007, p.80.
20. FRIEDRICHS, O., AGUEY-ZINSOU, F., FERNANDEZ, J.R.A, LOPEZ, J.C.S., JUSTO, A., KLASSEN, T., BORMANN, R., and FERNANDEZ, A., *Acta Materialia*, Vol. 54, 2006, p.105.
21. OELERICH, W., KLASSEN, T., EIGEN, N., and BORMANN, R., GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, D-21502 Geesthacht in "Functional Materials", edited by GRASSIE, K., TEUCKHOFF, E., WEGNER, G., HAUBELT, J., and HANSELKA, H., , *Euromat*, Vol. 13, Wiley-VCH, Weinheim 2000, p.141-145.