

**PREPARASI ALLOY Fe/Al DENGAN VARIASI KOMPOSISI DAN
APLIKASINYA SEBAGAI PENYIMPAN HIDROGEN DALAM SISTEM
METAL HIDRIDA**

SKRIPSI

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh
Gelar Sarjana Bidang Studi Kimia**



Oleh :

AGATHIS RAMADHANA

08031281621033

**JURUSAN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

2020

HALAMAN PENGESAHAN

**PREPARASI ALLOY Fe/Al DENGAN VARIASI KOMPOSISI DAN
APLIKASINYA SEBAGAI PENYIMPAN HIDROGEN DALAM SISTEM
METAL HIDRIDA**

SKRIPSI

Diajukan Untuk Melengkapi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Sains Bidang Studi Kimia

Oleh :

AGATHIS RAMADHANA

08031281621033

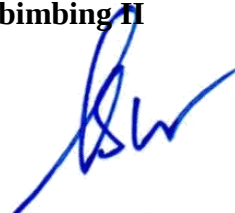
Indralaya, Juni 2020

Pembimbing I



Dr. Dedi Rohendi, M.T
NIP. 196704191993031001

Pembimbing II



Dr. Addy Rachmat, M.Si
NIP. 197409282000121001

Mengetahui,

Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Prof. Dr. Iskhaq Iskandar, M.Sc

NIP. 197210041997021001

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa skripsi ini dengan judul “Preparasi Alloy Fe/Al dengan Variasi Komposisi dan Aplikasinya sebagai Penyimpan Hidrogen dalam Sistem Metal Hidrida” telah dipertahankan di hadapan Tim Penguji Sidang Sarjana Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya pada Tanggal 16 Juni 2020 dan telah diperbaiki, diperiksa, serta disetujui sesuai masukan yang diberikan.

Indralaya, Juni 2020

Ketua :

1. **Dr. Dedi Rohendi, M.T**

NIP. 196704191993031001

()

Anggota :

2. **Dr. Addy Rachmat, M.Si**

NIP. 197409282000121001

()

3. **Dr. Nirwan Syarif, M.Si**

NIP. 197010011999031003

()

4. **Widia Purwaningrum, M.Si**

NIP. 197304031999032001

()

5. **Dr. Heni Yohandini, M.Si**

NIP. 197011152000122004

()

Mengetahui,

	
Dekan FMIPA	Ketua Jurusan Kimia
Prof. Dr. Iskhaq Iskandar, M.Sc	Dr. Hasanudin, M. Si
NIP. 197210041997021001	NIP. 197205151997021003

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama mahasiswa : Agathis Ramadhana
NIM : 08031281621033
Fakultas/Jurusan : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam/Kimia

Menyatakan bahwa skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri dan karya ilmiah ini belum pernah diajukan sebagai pemenuhan persyaratan untuk memperoleh gelar kesarjanaan strata (S1) dari Universitas Sriwijaya maupun perguruan tinggi lain.

Semua informasi yang dimuat dalam skripsi ini yang berasal dari penulis lain baik yang dipublikasikan atau tidak telah diberikan penghargaan dengan mengutip nama sumber penulis secara benar. Semua isi dari skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya sebagai penulis.

Demikianlah surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Indralaya, Juli 2020

Penulis,



Agathis
Agathis Ramadhana
NIM. 08031281621033

HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai civitas akademik Universitas Sriwijaya, yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama Mahasiswa : Agathis Ramadhana

NIM : 08031281621033

Fakultas/Jurusan : MIPA/Kimia

JenisKarya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, saya menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Sriwijaya “hak bebas royalti non-eksklusif (*non-exclusively royalty-free right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul: judul “Preparasi Alloy Fe/Al dengan Variasi Komposisi dan Aplikasinya sebagai Penyimpan Hidrogen dalam Sistem Metal Hidrida”. Dengan hak bebas royalti non-eksklusif ini Universitas Sriwijaya berhak menyimpan, mengalih, edit/memformatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir atau skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik hak cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya.

Indralaya, Juli 2020

Yang menyatakan,



Agathis Ramadhana

NIM. 08031281621033

ABSTRAK

PREPARASI ALLOY Fe/Al DENGAN VARIASI KOMPOSISI DAN APLIKASINYA SEBAGAI PENYIMPAN HIDROGEN DALAM SISTEM METAL HIDRIDA

Agathis Ramadhana : Dibimbing oleh Dr. Dedi Rohendi, M.T dan Dr. Addy Rachmat, M.Si
Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya
xi + 94 halaman, 9 tabel, 24 gambar dan 15 lampiran

Alloy Fe_3Al , FeAl_3 dan Fe_2Al_5 berhasil disintesis menggunakan metode *Mechanicall Alloying* dengan perpaduan logam Fe dan Al. Alloy Fe/Al dibuat dengan komposisi Al berturut-turut 13,87% b/b; 59,18% b/b dan 54,71% b/b dan waktu penggilingan selama 5 dan 15 jam. Alloy yang terbentuk dikarakterisasi menggunakan XRD dan diuji kinerja adsorpsi dan desorpsinya. Alloy dengan daya adsorpsi dan desorpsi terbesar dilanjutkan dengan karakterisasi SEM-EDX. Karakterisasi XRD untuk alloy Fe_3Al memiliki puncak khas pada sudut $44,798^\circ$ (milling 5 jam) dan $47,9^\circ$ serta $60,26^\circ$ (milling 15 jam). Alloy FeAl_3 memiliki puncak khas pada sudut 38° , 44° dan 64° (milling 5 jam) dan 38° serta 44° (milling 15 jam). Sementara itu, alloy Fe_2Al_5 memiliki puncak khas pada sudut 44° , 65° dan 78° (milling 5 jam), dan 44° serta 64° (milling 15 jam). Alloy yang berhasil disintesis dan sesuai JCPDS dengan ukuran kristalinitas yang besar diaplikasikan sebagai material penyimpan hidrogen (*hydrogen storage*) dalam bentuk metal hidrida. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daya adsorpsi hidrogen meningkat dengan meningkatnya tekanan, namun daya penyerapan menurun dengan meningkatnya temperatur. Alloy dengan daya adsorpsi dan desorpsi tertinggi dihasilkan dari alloy Fe_3Al dengan daya adsorpsi sebesar 31,82% b/b pada tekanan 3 bar dan temperatur 30°C . Sementara itu, daya desorpsinya sebesar 31,65% pada temperatur 30°C . Karakterisasi SEM-EDX dilakukan pada alloy Fe_3Al yang digiling selama 5 jam dan menghasilkan ukuran granular serta komposisi yang berbeda antara sebelum dan setelah adsorpsi hidrogen. Ukuran granular pada alloy sebelum adsorpsi lebih kecil daripada alloy setelah adsorpsi. Sementara itu, komposisi pada alloy sebelum adsorpsi lebih sedikit dibandingkan pada alloy setelah adsorpsi. Analisis termodinamika dari data adsorpsi hidrogen pada variasi temperatur untuk setiap alloy berlangsung spontan karena energi bebas Gibbs bernilai negatif dan nilai ΔH lebih kecil dari nilai T ΔS . Entalpi (ΔH) dan entropi (ΔS) adsorpsi bernilai positif yang menunjukkan bahwa adsorpsi berlangsung endoterm dan meningkatkan peluang reaksi adsorpsi berjalan spontan. Hasil penelitian menunjukkan energi bebas Gibbs terendah pada temperatur 323 K dengan nilai $-0,3301 \text{ kJ/mol}$ untuk alloy Fe_3Al . Nilai $\Delta G < 0$ dan $\Delta H > 0$ menunjukkan bahwa reaksi berlangsung secara spontan dan endotermik.

Kata Kunci : Metal Hidrida, Adsorpsi Hidrogen, Fe_3Al , FeAl_3 , Fe_2Al_5

Sitasi : 60 (1990-2019)

Indralaya, Juli 2020

Pembimbing I

Dr. Dedi Rohendi, M.T.
NIP. 196704191993031001

Pembimbing II

Dr. Addy Rachmat, M.Si.
NIP. 197409282000121001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Kimia

Dr. Hasanudin, M. Si
NIP. 197205151997021003

ABSTRACT

PREPARATION OF ALLOY Fe/Al WITH VARIATION COMPOSITION AND ITS APPLICATION AS HYDROGEN STORAGE IN METAL HYDRIDE SYSTEM

Agathis Ramadhana : Supervised by Dr. Dedi Rohendi, M.T and Dr. Addy Rachmat, M.Si
Departement of Chemistry, Faculty of Mathematics And Natural Sciences, Sriwijaya University

xi + 94 pages, 9 tables, 24 images and 15 attachments

Fe₃Al, FeAl₃ and Fe₂Al₅ alloys for hydrogen storage were successfully synthesized using Mechanical Alloying method with a combination of Fe and Al metals. Alloy Fe/Al made in the composition of Al by 13.87% w/w; 59.18% w/w and 54.71% w/w in a milling time for 5 and 15 hours. Alloys were characterized using XRD and their adsorption desorption performance were tested. Alloys with the largest adsorption and desorption capacities were characterized using SEM-EDX. The XRD characterization for Fe₃Al alloys shows typical peaks at 44.798° (5 hours milling), 47.9° and 60.26° (15 hours milling). Alloy Fe₂Al₅ shows typical peaks at 44°, 65° and 78° (5 hour milling), 44° and 64° (15 hour milling). Meanwhile, FeAl₃ alloy has typical peaks at 38°, 44° and 64° (5 hour milling), 38° and 44° (15 hour milling). The alloy which was successfully synthesized and according to JCPDS with a large crystallinity size was applied as a hydrogen storage material in the form of metal hydride. The results showed that the capacity of hydrogen adsorption increases with increasing pressure, but the adsorption capacity decreases with increasing temperature. Alloy with the highest adsorption and desorption capacities were produced from Fe₃Al alloy with adsorption capacity of 31.82% w/w at 3 bar pressure and 30°C temperature. Meanwhile, its desorption capacity is 31.65% w/w at a temperature of 30°C. SEM-EDX characterization was carried out on Fe₃Al alloys which were milled for 5 hours and produced granules sizes and different compositions between before and after hydrogen adsorption. The granular size of the alloy before adsorption is smaller than the alloy after adsorption. Meanwhile, the composition in the alloy before adsorption is less than in the alloy after adsorption. Thermodynamic analysis of hydrogen adsorption at temperature variations for each alloy occur spontaneously because Gibbs free energy is negative and ΔH is smaller than $T\Delta S$. Enthalpy (ΔH) and entropy (ΔS) adsorption are positive which indicates that the adsorption occur endothermic and increases the chance of the adsorption reaction occur spontaneously. The results showed the lowest Gibbs free energy at 323 K with a value of -0.3301 kJ/mol for Fe₃Al alloys. Values of $\Delta G < 0$ and $\Delta H > 0$ indicate that the reaction is spontaneous and endothermic.

Keywords : Metal Hydride, Hydrogen Adsorption, Fe₃Al, FeAl₃, Fe₂Al₅

Citation : 60 (1990-2019)

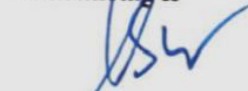
Pembimbing I



Dr. Dedi Rohendi, M.T.
NIP. 196704191993031001

Indralaya, Juli 2020

Pembimbing II



Dr. Addy Rachmat, M.Si.
NIP. 197409282000121001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Kimia



Dr. Hasanudin, M. Si
NIP. 197205151997021003



HALAMAN PERSEMBAHAN

Bismillahirrahmanirrahim

Dengan mengucapkan syukur Alhamdulillah atas rahmat dan karunia Allah SWT serta salawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW. Saya dapat menyelesaikan skripsi ini sebuah karya kecil yang kupersembahkan untuk:

Kedua orang tuaku yang telah menjadi motivator terbaik dalam hidupku.

Saudaraku serta Keponakanku.

Sahabat-sahabatku.

Almamaterku Universitas Sriwijaya.

“Sesungguhnya Allah tidak akan merubah keadaan suatu kaum sehingga mereka merubah keadaan yang ada pada diri mereka sendiri” (QS. Ar Ra’d : 11)

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai kesanggupannya” (QS. Al Baqarah : 286)

“Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan” (QS. Al-Insyirah : 6)

“Orang-orang yang berilmu kemudian dia memanfaatkan ilmu tersebut (bagi orang lain) akan lebih baik dari seribu orang yang beribadah atau ahli ibadah” (H.R Ad-Dailami)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya lah penulis dapat menyusun dan menyelesaikan penelitian serta penulisan skripsi yang berjudul “Preparasi Alloy Fe/Al dengan Variasi Komposisi dan Aplikasinya sebagai Penyimpan Hidrogen dalam Sistem Metal Hidrida” Shalawat serta salam tercurahkan kepada Rasulullah SAW, keluarga dan sahabatnya.

Proses penyusunan dalam menyelesaikan skripsi ini penulis sangat menyadari mendapat banyak dukungan dan bimbingan serta bantuan dari berbagai pihak baik materi maupun moril. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada bapak **Dr. Dedi Rohendi, M.T.** dan bapak **Dr. Addy Rachmat, M.Si.** atas segala bimbingan, motivasi, saran, petunjuk, kesabaran dan waktu yang diluangkan kepada penulis selama menjalankan penelitian dan penyusunan penulisan skripsi ini hingga selesai, juga kepada Universitas Sriwijaya atas bantuan fasilitas dalam penelitian.

Selain itu, penulis juga mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT dan nabi Muhammad SAW atas rahmat dan ridho-Nya penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini dengan lancar.
2. Bapak Prof. Dr. Iskhaq Iskandar, M.Sc selaku Dekan FMIPA Universitas Sriwijaya.
3. Bapak Dr. Hasanudin, M.Si selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya.
4. Bapak Dr. Addy Rachmat, M.Si selaku Sekretaris Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya.
5. Bapak Dr. rer. nat. Risfidian Mohadi, M.Si selaku dosen Pembimbing Akademik.
6. Bapak Dr. Nirwan Syarif, M.Si, Ibu Widia Purwaningrum, M.Si dan Ibu Dr. Heni Yohandini, M.Si selaku dosen pembahas dan penguji sidang sarjana.
7. Ibu Dr. Ferlinahayati, M.Si selaku koordinator Seminar dan Sidang Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya.

8. Seluruh Dosen Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya yang telah mendidik dan membimbing selama masa kuliah.
9. Admin dan Analis Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya atas bantuan yang ikhlas kepada penulis.
10. Kedua orang tua tercinta, Papa dan Mama terima kasih atas segala cinta dan kasih sayang, do'a dan dukungan baik materi maupun moril yang selalu diberikan. Kalian adalah support systemku dalam menyelesaikan skripsi ini.
11. Keluarga besar tercinta, saudaraku, keponakanku, teh nia, teh vera, kak zahran dan neng nadin terima kasih untuk canda dan tawanya yang selalu menyemangati serta dukungan baik materi maupun moril yang telah diberikan.
12. Sahabatku M. Alfadilla Akbar, S.Ked terima kasih telah menemani di setiap kondisi yang selalu menyemangati di kondisi suka maupun duka hingga akhirnya bisa menyelesaikan skripsi ini.
13. Strong Girlsku tercinta, tita, ar, oci, saski dan hana terima kasih untuk canda dan tawanya yang menyemangati mulai dari awal pencarian kuliah hingga akhir menyelesaikan skripsi ini dengan berbagai macam drama.
14. Sahabatku yang kusayang, Meyliza dan Yasinta terima kasih telah membuat kehidupan kampusku berwarna, menemani, bantuan dan menyemangati di setiap kondisiku, menyayangiku serta sabar menghadapi segala sikapku.
15. Partner Taku, Uwid terima kasih telah menemani kesana-kemari selama proses penelitian hingga penyelesaian skripsi ini, atas kesabaran dan perhatian yang telah diberikan serta selalu menyemangati.
16. Partner PPku, Ayu Hartati terima kasih telah menemani PP perum-layo selama masa kuliah, saran, bantuan dan dukungan yang telah diberikan selama ini.
17. Tutorku, Kak Icha terima kasih telah mengajariku banyak hal serta membantu dalam penelitian, menjawab semua pertanyaanku dengan sabar dan selalu menyemangati hingga akhirnya skripsi ini selesai.
18. Kakak Team PUR (Kak Dwi, Kak Reka dan Kak Dea) terima kasih untuk saran, bantuan dan dukungan yang telah diberikan.

19. Kak Tini terima kasih atas bantuan, saran, dukungan yang telah diberikan dan telah menjadi partner jajanku selama beberapa bulan terakhir ini yang menemaniku memecahkan masalah.
20. PUR Gen'16 (Juwi, Rahmah, Aydes, Novia, Wini, Yuni, Hilal, Hafis, Faisal dan Dhoan) terima kasih atas bantuan, saran dan dukungan serta canda tawanya selama ini. Semangat buat kalian dan sukses selalu.
21. Teman-teman Kimia 2016 terima kasih atas kebersamaan selama masa perkuliahan dan memberikan pesan-kesan terindah selama masa kuliah. Semoga sukses untuk kita semua.
22. Teman-teman Kimia Ganjil 2016, terima kasih telah memberikan pesan-kesan dan kenangan terindah selama masa kuliah.
23. Bangsawan Berhijrah, terima kasih telah menemani, mengajarkan serta berbagai ilmu dan memberikan kenangan terindah selama masa kuliah.
24. Adik asuhku, Delima dan Candra terima kasih atas perhatian dan dukungan yang telah kalian berikan. Semangat kuliahnya dan sukses selalu.
25. Seluruh kakak tingkat dan adik tingkat FMIPA KIMIA UNSRI serta semua pihak yang telah membantu serta memberikan saran dan masukan baik secara langsung maupun tidak langsung kepada penulis dalam penulisan skripsi ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu namanya.

Demikianlah, semoga karya kecil ini dapat bermanfaat dalam menunjang perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya bidang Fuel Cell dan Hidrogen.

Palembang, Juli 2020

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH.....	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
HALAMAN PERSEMBAHAN	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Manfaat Penelitian	4
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Hidrogen	5
2.2. Hidrogen sebagai Bahan Bakar.....	6
2.3. Penyimpanan Hidrogen.....	6
2.3.1 Penyimpanan dengan Tangki Tekanan Tinggi	7
2.3.2 Penyimpanan dengan Kriogenik Hidrogen Cair.....	7
2.3.3 Penyimpanan dengan Metal Hidrida.....	8
2.3.4 <i>Metal Organic Framework</i> (MOFs)	9
2.4. Alloy	10
2.4.1 Interaksi Alloy.....	10
2.4.1.1 Larutan Padat Substitusi	10

2.4.1.2 Larutan Padat Interstitial.....	11
2.4.2 Klasifikasi Alloy.....	11
2.4.2.1 Perpaduan Besi (<i>Ferrous Alloy</i>).....	12
2.4.2.2 Perpaduan Bukan Besi (<i>Non-Ferrous Alloy</i>).....	12
2.5. Paduan Logam Fe-Al	12
2.6 <i>Mechanical Alloying</i>	13
2.7 Parameter <i>Milling</i>	14
2.7.1 Tipe <i>Milling</i>	14
2.7.2 Wadah <i>Milling</i>	14
2.7.3 Kecepatan <i>Milling</i>	14
2.7.4 Waktu <i>Milling</i>	14
2.7.5 Media Penggiling	15
2.7.6 Rasio Berat Bola dengan Serbuk (<i>ball powder weight ratio</i>)	15
2.7.7 Ruang Kosong pada Vial	15
2.7.8 Atmosfer <i>milling</i>	16
2.7.9 Agen kontrol proses (<i>process control agent</i>).....	16
2.7.10 Temperatur <i>Milling</i>	16
2.8 Mekanisme <i>Mechanical Alloying</i>	17
2.8.1 Tahap Awal.....	17
2.8.2 Tahap Pertengahan.....	17
2.8.3 Tahap Akhir	17
2.9 Bola Giling (<i>Ball milling</i>).....	18
2.10 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	19
2.11 <i>Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray</i> (SEM-EDX).....	22
2.12 Termodinamika Adsorpsi	24

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat	25
3.2 Alat dan Bahan	25
3.3 Prosedur Penelitian.....	25
3.3.1 Sintesis Alloy Fe-Al dengan Metode	

<i>Mechanical Alloying</i>	25
3.3.2 Karakterisasi Alloy FeAl.....	26
3.3.3 Uji Daya Adsorpsi dan Desorpsi Hidrogen.....	26
3.3.4 Uji Termodinamika Adsorpsi Hidrogen.....	26
3.4 Analisis Data	27
3.4.1 Penentuan Daya Penyimpanan Hidrogen	27
3.4.2 Penentuan Daya Pelepasan Hidrogen.....	27
3.4.3 Uji Termodinamika Adsorpsi Hidrogen.....	27
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Sintesis Alloy Fe-Al dengan Metode <i>Mechanical Alloying</i>	28
4.2 Karakterisasi Alloy Fe-Al dengan XRD.....	29
4.3 Hasil Uji Daya Adsorpsi dan Desorpsi Hidrogen.....	33
4.4 Karakterisasi Alloy Fe ₃ Al dengan SEM-EDX	37
4.4.1 Analisis SEM Sebelum dan Setelah Adsorpsi Hidrogen	37
4.4.2 Analisis EDX Sebelum dan Setelah Adsorpsi Hidrogen	38
4.5 Analisis Termodinamika Adsorpsi Hidrogen	39
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	42
5.2 Saran	42
DAFTAR PUSTAKA	43
LAMPIRAN	48

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Larutan Padat Substitusi.....	11
Gambar 2. Larutan padat Interstitial	11
Gambar 3. Diagram Kestimbangan Fase Fe-Al	13
Gambar 4. Mekanisme Tumbukan Serbuk dengan Bola	18
Gambar 5. Wadah Milling dan <i>ball mill</i>	18
Gambar 6. Prinsip Kerja HEM-E3D	19
Gambar 7. Prinsip Kerja XRD	20
Gambar 8. Difraktogram Fe ₂ Al ₅ Variasi Suhu.....	21
Gambar 9. Difraktogram FeAl ₃	21
Gambar 10. Difraktogram Fe ₃ Al.....	22
Gambar 11. SEM Berkas Elektron Berenergi Tinggi	22
Gambar 12. Morfologi Alloy FeAl ₃ pada variasi waktu milling	23
Gambar 13. Perbedaan Warna Hasil <i>Milling</i>	29
Gambar 14. Difraktogram pada Alloy Fe ₂ Al ₅	30
Gambar 15. Difraktogram pada Alloy FeAl ₃	31
Gambar 16. Difraktogram pada Alloy Fe ₃ Al	32
Gambar 17. Pengaruh Temperatur terhadap Daya Adsorpsi Hidrogen	34
Gambar 18. Pengaruh Tekanan terhadap Daya Adsorpsi Hidrogen	34
Gambar 19. Morfologi Permukaan Hasil SEM untuk Alloy Fe ₃ Al 5 jam	37
Gambar 20. Spektrum EDX untuk Alloy Fe ₃ Al 5 jam.....	38
Gambar 21. Adsorpsi Hidrogen vs 1/T	40
Gambar 22. Grafik plot $\ln P_{H_2}$ vs 1/T pada Alloy Fe ₃ Al	86
Gambar 23. Grafik plot $\ln P_{H_2}$ vs 1/T pada Alloy Fe ₂ Al ₅	89
Gambar 24. Grafik plot $\ln P_{H_2}$ vs 1/T pada Alloy FeAl ₃	91

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Sifat Fisika Hidrogen	5
Tabel 2. Daya Desorpsi saat Adsorpsi variasi Temperatur	36
Tabel 3. Daya Desorpsi saat Adsorpsi variasi Tekanan	36
Tabel 4. Data Termodinamika Adsorpsi Hidrogen	40
Tabel 5. Kekerasan Mikro dari Senyawa Intermetalik Sistem Alloy Fe-Al	52
Tabel 6. Ukuran Kristal Perpaduan Logam Fe-Al	59
Tabel 7. Data Termodinamika Adsorpsi Hidrogen pada Alloy Fe_3Al	86
Tabel 8. Data Termodinamika Adsorpsi Hidrogen pada Alloy Fe_2Al_5	88
Tabel 9. Data Termodinamika Adsorpsi Hidrogen pada Alloy FeAl_3	91

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Skema Kerja	49
Lampiran 2. Perhitungan dan Penentuan Rumus Molekul Alloy	52
Lampiran 3. Data Difraktogram XRD pada Fe_3Al yang <i>dimilling</i> 5 jam	53
Lampiran 4. Data Difraktogram XRD pada Fe_3Al yang <i>dimilling</i> 15 jam	54
Lampiran 5. Data Difraktogram XRD pada Fe_2Al_5 yang <i>dimilling</i> 5 jam	55
Lampiran 6. Data Difraktogram XRD pada Fe_2Al_5 yang <i>dimilling</i> 15 jam	56
Lampiran 7. Data Difraktogram XRD pada FeAl_3 yang <i>dimilling</i> 5 jam	57
Lampiran 8. Data Difraktogram XRD pada FeAl_3 yang <i>dimilling</i> 15 jam	58
Lampiran 9. Data dan Perhitungan Ukuran kristal Alloy Fe-Al	59
Lampiran 10. Data Uji Daya Adsorpsi dan Desorpsi Hidrogen.....	62
Lampiran 11. Perhitungan Daya Adsorpsi dan Desorpsi Hidrogen.....	65
Lampiran 12. Gambar Morfologi SEM pada Perpaduan Logam Fe_3Al Sebelum dan Setelah Adsorpsi Gas Hidrogen	71
Lampiran 13. Data Digital Spektrum EDX pada Perpaduan Logam Fe_3Al Sebelum dan Setelah Adsorpsi Hidrogen	73
Lampiran 14. Data Perhitungan Termodinamika Adsorpsi Gas Hidrogen pada Perpaduan Logam Fe-Al	86
Lampiran 15. Gambar Alat	94

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Aktivitas manusia di era modern seperti sekarang ini membutuhkan beragam sumber energi yang dihasilkan salah satunya dengan penggunaan bahan bakar. Bahan bakar yang digunakan saat ini masih didominasi dengan bahan bakar fosil yang bersifat tidak dapat diperbarui. Penggunaan bahan bakar fosil secara terus menerus dapat mengakibatkan ketersediaan bahan bakar fosil semakin menipis dan tidak mampu untuk memenuhi kebutuhan di masa yang akan datang (Alimah dan Dewita, 2008). Oleh karena itu diperlukan energi alternatif yang dapat diperbarui. Energi terbarukan yang saat ini sedang dikembangkan adalah *fuel cell*. *Fuel cell* merupakan perangkat elektrokimia yang dapat mengubah energi kimia menjadi energi listrik (Mahapatra and Singh, 2013) dan panas yang ditandai dengan efisiensi tinggi dan emisi polutan yang rendah (Coralli *et al.*, 2019). Salah satu bahan bakar *fuel cell* yang bersifat reversibel adalah hidrogen.

Hidrogen dikenal sebagai sumber energi yang bersih dan teringan di dunia, akan tetapi bersifat sangat reaktif dan mudah terbakar sehingga diperlukan cara yang dapat digunakan untuk menyimpan dengan aman (Pradana dan Purwaningsih, 2013). Penyimpanan hidrogen dengan cara yang aman dan ekonomis telah banyak dikembangkan dengan berbagai metode salah satunya adalah metal hidrida (Larminie and Dicks, 2003). Metal hidrida merupakan senyawa logam yang berikatan dengan ion negatif hidrogen. Metal hidrida dapat diaplikasikan sebagai media penyimpanan hidrogen yang bersifat reversibel pada tekanan rendah dan dapat dioperasikan untuk adsorpsi dan desorpsi serta memiliki kinetika yang baik (Dewa *et al.*, 2015). Metal hidrida sebagai media penyimpanan hidrogen dengan beberapa keunggulan yaitu, biayanya murah, kondisi operasi yang baik, dapat didaur ulang, ramah lingkungan (Kumar *et al.*, 2019) dan kondisi termokimia yang ideal (Manickam *et al.*, 2018). Aplikasi metal hidrida sebagai media penyimpanan hidrogen memiliki tingkat kepadatan yang tinggi dibandingkan dalam bentuk gas hidrogen atau hidrogen cair (Rahwanto *et al.*, 2009). Penerapan metal hidrida juga dapat diaplikasikan pada baterai yaitu baterai nikel metal hidrida.

Material yang digunakan sebagai media penyimpanan hidrogen biasanya berupa alloy atau campuran logam yang memiliki kemampuan mengikat atau menyerap hidrogen dan membentuk metal hidrida (Dewa *et al.*, 2015). Alloy sendiri dikenal sebagai suatu campuran logam (Yang *et al.*, 2019). Jenis alloy yang biasa digunakan untuk menyimpan hidrogen merupakan logam-logam yang reaktif dan memiliki potensi oksidasi logam yang rendah.

Alloy yang banyak digunakan salah satunya adalah Mg_2Ni , Mg-Al dan Fe-Ti. Magnesium mampu menyerap hidrogen hingga 7,6% b/b karena magnesium termasuk dalam golongan alkali tanah yang merupakan logam reaktif, akan tetapi penggunaannya untuk menyimpan hidrogen tidak praktis karena dehidrogenasinya sangat lambat (Adi dkk, 2008). Magnesium masih dapat digunakan untuk menyimpan hidrogen dengan cara memadukan dengan aluminium. Perpaduan Mg-Al telah banyak dilakukan sebagai media penyimpanan hidrogen yang lebih baik karena perpaduan ini dapat terbentuk secara metastabil dan dapat mengikat hidrogen lebih banyak (Pradana dan Purwaningsih, 2013).

Alloy Fe-Ti diaplikasikan sebagai media penyimpanan hidrogen karena dapat membentuk hidrida dan secara kinetika memiliki kesetimbangan tekanan hidrogen relatif tinggi. Secara termodinamika alloy Fe-Ti dapat menyerap serta melepaskan hidrogen pada suhu kamar, namun tidak dapat memenuhi kepadatan energi. Hal ini dikarenakan daya adsorpsinya rendah sehingga diperlukan penambahan suatu atom yang dapat mengikat hidrogen dengan jumlah lebih banyak salah satunya adalah aluminium. Aluminium dapat mengikat hidrogen lebih banyak karena memberikan efisiensi volume sehingga menguntungkan untuk penyimpanan hidrogen (Dewa *et al.*, 2015).

Alloy yang akan disintesis pada penelitian ini ialah alloy Fe-Al dengan menggunakan metode *Mechanical Alloying* melalui alat penggilingan bola atau *High Energi Milling* (HEM). Penggunaan metode ini karena campuran logam yang dihasilkan berukuran sangat kecil (Suwarno *et al.*, 2007), homogen dan sangat halus serta tidak menyebabkan paduan logam meleleh. Selain itu, metode ini sesuai untuk perpaduan logam yang memiliki perbedaan titik leleh cukup tinggi (Sari, 2007). Pemilihan perpaduan logam Fe dan Al sebagai media untuk menyimpan hidrogen karena memiliki beberapa keunggulan diantaranya, biayanya murah, rapat

massanya rendah, resistansi yang baik dan ketersediaan material mudah didapat (Airiskallio *et al.*, 2010). Logam Fe dan Al mengikat atom hidrogen lebih banyak membentuk metal hidrida. Hal ini dikarenakan logam Fe dan Al merupakan atom yang memiliki elektron valensi 3^+ selain itu, logam Fe memiliki kinetika yang baik pada saat adsorpsi hidrogen.

Ketersediaan logam Fe dan Al yang berlimpah di muka bumi dengan harga terjangkau serta sifat yang dimiliki kedua logam ini untuk menyimpan hidrogen menjadi bahan pertimbangan sebagai material yang akan digunakan dalam penelitian ini. Pembuatan alloy Fe-Al dalam penelitian ini dilakukan pada variasi komposisi dan waktu *milling*. Variasi komposisi ini untuk mengetahui komposisi Fe dan Al manakah yang dapat menyerap hidrogen dengan optimum, sedangkan variasi waktu *milling* untuk melihat alloy dengan kristalinitas yang baik untuk diuji daya adsorpsi dan desorpsinya.

Alloy Fe-Al yang telah disintesis dikarakterisasi dengan *X-Ray Diffraction* (XRD). Karakterisasi ini untuk mengetahui fasa dan intensitas puncak yang terbentuk serta ukuran kristalinitas. Alloy dengan daya adsorpsi hidrogen terbesar dilanjutkan dengan karakterisasi *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX). Karakterisasi alloy dengan daya hidrogen terbesar dilakukan pada alloy sebelum dan setelah adsorpsi yang bertujuan untuk mengetahui morfologi dari alloy.

Data adsorpsi hidrogen pada variasi temperatur setiap alloy dianalisis sisi termodinamikanya. Analisis termodinamika ini perlu dilakukan untuk mengetahui sifat termodinamika dari material yang digunakan sebagai media penyimpanan hidrogen terkait dengan temperatur dan tekanan yang digunakan pada saat proses adsorpsi (Suci, 2015). Parameter termodinamika adsorpsi hidrogen dapat ditentukan dengan menghitung entalpi adsorpsi (ΔH), entropi adsorpsi (ΔS) dan energi bebas Gibbs (ΔG).

1.2 Rumusan Masalah

Alloy Fe-Al dibuat dengan variasi komposisi menggunakan metode *mechanical alloying* pada variasi waktu *milling*. Alloy dengan waktu *milling* manakah yang memiliki kristalinitas tinggi dilakukan uji adsorpsi hidrogen pada variasi tekanan dan temperatur serta uji desorpsi hidrogen. Bagaimanakah pengaruh

komposisi Fe-Al terhadap kemampuan adsorpsi dan desorpsinya serta analisis dari sisi termodinamika pada adsorpsi hidrogen.

1.3 Tujuan Penelitian

1. Melakukan proses pembentukan alloy Fe dan Al dengan metode *mechanical alloying* dengan tiga komposisi berbeda yaitu komposisi Al 13,87% b/b; 59,18% b/b dan 54,71% b/b serta melakukan karakterisasi alloy menggunakan XRD dan SEM-EDX.
2. Menentukan daya adsorpsi dan desorpsi gas hidrogen pada tiga alloy Fe-Al dengan waktu *milling* yang memiliki kristalinitas tinggi pada variasi tekanan dan temperatur.
3. Mempelajari aspek termodinamika adsorpsi gas hidrogen dari tiga alloy Fe-Al dengan waktu *milling* yang memiliki kristalinitas tinggi pada variasi temperatur.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi terhadap pengembangan *fuel cell* berupa informasi media penyimpanan gas hidrogen yang berasal dari paduan Fe-Al

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M. and Khairurrijal. 2009. Review : Karakterisasi Nanomaterial. *Jurnal Nanosains dan Nanoteknologi*. 2(1): 1–9.
- Abrini, D., Ardhy, S. dan Putra, H. 2017. Uji Kekerasan pada Paduan Fe-50 % atAl dengan Penambahan Nikel Menggunakan Metode Mechanical Alloying. *Jurnal Teknik Mesin Institut Teknologi Padang*. 7(1): 45–49.
- Adi, W. A., Insani, A. dan Suwarno, H. 2008. Analisis Struktur Kristal Paduan Mg₂Ni Hasil Mechanical Alloying. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 9(2): 125–130.
- Airiskallio, E., Nurmi, E., Heinonen, M. H., Vayrynen, I. J., Kokko, K., Ropo, M., Punkkinen, M. P. J., Pitkanen, H., Alatalo, M., Kollar, J., Johansson, B. and Vitos, L. 2010. High Temperature Oxidation of Fe-Al and Fe-Cr-Al Alloys: The role of Cr as a Chemically Active Element. *Corrosion Science*. 52(10): 3394–3404.
- Alimah, S. and Dewita, E. 2008. Pemilihan Teknologi Produksi Hidrogen dengan Memanfaatkan Energi Nuklir. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*. 10(2): 123–132.
- Anonim. 2012. How Does Scanning Electron Microscope / Energy Dispersive X-ray (SEM / EDX). *Gossman Forensics*.
- Bajili, A., Hamdi dan Dwiridal, L. 2014. Karakterisasi Mineral Pada Batu Granit di Sekitar Gunung Marapi Daerah Sumatera Barat Menggunakan X-Ray Diffraction (XRD). *Pillar of Physics*. 1(1): 1–8.
- Bakhshai, A. 2004. Is Ball Milling An Innovative Technique For the Production of Zn From ZnO. *Verge* 8.
- Becherif, M., Ramadan, H. S., Cabaret, K., Picard, F., Simoncini, N. and Bethoux, O. 2015. Hydrogen Energy Storage: New Techno-Economic Emergence Solution Analysis. *Energy Procedia*. 74(1): 371–380.
- Bhuiya, M. M. H., Kumar, A. and Kim, K. J. 2015. Metal Hydrides in Engineering Systems, Processes, and Devices: A review of non-Storage Applications. *International Journal of Hydrogen Energy*. 40(5): 1–17.
- Broom, D. P. 2011. *Hydrogen Storage Materials, Green Energy and Technology*. London: Springer.
- Cebulski, J., Fornalczyk, A. and Pasek, D. 2014. Comparison of High Temperature Corrosion Resistance in Gaseous Environment of Alloys based on Intermetallic Phase Matrix Fe₄₀Al₅CrZrb And Steel X₁₂CrCoNi₂₁₂₀. *Archives of Metallurgy and Materials*. 59(2): 447-450.

- Cheng, Q., Sun, D. and Yu, X. 2018. Metal hydrides for Lithium-ion Battery Application: A review. *Journal of Alloys and Compounds*. 769(1): 167–185.
- Clark, N. J. and Wu, E. 1990. Hydrogen Absorption in the ZrAl System. *Journal of The Less-Common Metals*. 163(2): 227-243.
- Coralli, A., Sarruf, B. J. M., Miranda, P. E. V., Osmieri, L., Specchia, S. and Minh, N. Q. 2019. *Chapter 2 - Fuel Cells, Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies*. California: Elsevier Inc.
- Delavar, M., Ghoreyshi, A. A., Jahanshahi, M., Khalili, S and Nabian, N. 2012. Equilibria and Kinetics of Natural Gas Adsorption on Multi-walled Carbon Nanotube Material. *Royal Society of Chemistry*. 2(10): 4491–4498.
- Dewa, M. D. K., Wiryolukito, S. and Suwarno, H. 2015. Hydrogen Absorption Capacity of Fe-Ti-Al Alloy Prepared by High Energy Ball Milling. *Energy Procedia*. 68(1): 318-325.
- Durbin, D. J. and Jugroot, M. C. 2013. Review of Hydrogen Storage Techniques for on Board Vehicle Applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(34): 1-23.
- Eftekhari, A. and Fang, B. 2017. Electrochemical Hydrogen Storage: Opportunities for Fuel Storage, Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors. *International Journal of Hydrogen Energy*. 42(40): 25143-25165.
- Eskandarany, M. S. E. 2015. *Mechanical Alloying (Second Edition) Nanotechnology, Materials Science and Powder Metallurgy*. New York: William Andrew.
- Eumann, M., Palm, M. and Sauthoff, G. 2004. Alloys Based on Fe₃Al or FeAl with Strengthening Mo₃Al Precipitates. *Intermetallics*. 12(6): 625-633.
- Gouda, E. S. 2014. Classifications , Characterization and Applications of Metallic Alloys. *International Journal of Physics and Astronomy*. 2(2): 15-49.
- Gupta, R. K., Murty, B. S. and Birbilis, N. 2017. *An Overview of High-energy Ball Milled Nanocrystalline Aluminum Alloys*. Switzerland: Springer International Publishing.
- Kang, H. Z. and Hu, C. T. 2004. Swelling Behavior in Reactive Sintering of Fe-Al Mixtures. *Materials Chemistry and Physics*. 88(2–3): 264–272.
- Kumar, K., Alam, M., Rakshit, D. and Dutta, V. 2019. Operational Characteristics of Metal Hydride Energy Storage System in Microgrid. *Energy Conversion and Management*. 187(3): 176–190.
- Larminie, J. and Dicks, A. 2003. *Fuel Cell Systems Explained*. England: Library of Congress Cataloging-in-Publication Data.

- Li, Y. J., Wu, H. Q., Wang, J. and Yin, Y. S. 2003. Characterisation of Interface in Diffusion Bonded Fe₃Al/Q235 Carbon Steel Dissimilar Material. *Materials Science and Technology*. 19(2): 227–230.
- Mahapatra, M. K. and Singh, P. 2013. *Fuel Cells. Energy Conversion Technology*. Second Edi, *Future Energy: Improved, Sustainable and Clean Options for our Planet Second Edi*. USA: Elsevier Inc.
- Manickam, K., Mistry, P., Walker, G., Grat, D., Buckley, C. E., Humphries, T. D., Paskevicius, T. J., Albert, R., Peinecke, K. and Felderhoff, M. 2018. Future Perspectives of thermal energy storage with metal hydrides. *International Journal of Hydrogen Energy*. xxx(1): 1-8.
- Miranda, J. L. L., Romero, J. R. R., Esparza, R. and Rosas, G. 2013. Structural Evolution of FeAl₃ Intermetallic during High-Energy Ball-Milling. *Materials Science Forum*. 755(1): 133–138.
- Mustanir dan Jalil, Z. 2009. Pengaruh Lama Miling Terhadap Sifat Absorpsi Material Penyimpan Hidrogen MgH₂ yang Dikatalisasi dengan Fe. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis*. 4(2): 69-72.
- Neikov, O. D. 2019. *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders Second Edition*. Amsterdam: Elsevier.
- Nicoletti, Giovanni., Arcuri, N., Nicoletti, Gerardo. and Bruno, R. 2015. A Technical and Environmental Comparison Between Hydrogen and Some Fossil Fuels. *Energy Conversion and Management*. 89(1), pp. 205–213.
- Pradana, N. A. dan Purwaningsih, H. 2013. Pengaruh Variasi Lama Waktu Hidrogenasi terhadap Pembentukan Metal Hidrida pada Paduan MgAl. *Jurnal Teknik Pomits*. 2(1): 31-35.
- Pratama, F. B. dan Widyastuti. 2012. Pengaruh Penambahan Ni , Cu dan Al dan Waktu Milling pada Mechanical Alloying Terhadap Sifat Absorpsi dan Desorpsi Mg sebagai Material Penyimpan Hidrogen. *Jurnal Teknik ITS*. 1(1): 97–101.
- Putra, A. M. 2010. Analisis Produktifitas Gas Hidrogen dan Gas. *Jurnal Neutrino*, 2(2): 141-154.
- Qi, N., Hu, M., Wang, Z., Lu, Z. and Xie, C. 2013. Synthesis of Al/Fe₃Al Core-shell Intermetallic Nanoparticles by Chemical Liquid Deposition Method. *Advanced Powder Technology*. 24(6): 926–931.
- Rahwanto, A., Mustanir., Fauzi. dan Jalil, Z. 2009. Fabrikasi Material Nanokristal SiC sebagai Katalis pada Material Penyimpanan Hidrogen. *Jurnal Sains MIPA*. 15(2): 71-74.
- Sakintuna, B., Lamari-Darkrim, F. and Hirscher, M. 2007. Metal Hydride Materials for Solid Hydrogen Storage: A review. *International Journal of Hydrogen*

- Energy*. 32(9): 1121-1140.
- Sari, N., Rahwanto, A. and Jalil, Z. 2016. Studi Katalis Ni Nano pada Material Penyimpan Hidrogen MgH_2 yang Dipreparasi melalui Teknik Mechanical Alloying. *Indonesian Journal of Applied Physics*. 6(01): 1-5.
- Sari, R. P. 2007. Pembuatan Paduan Mg_2Ni dan $MgNi_2$ dengan Metode Mechanical Alloying dan Karakterisasinya. *Skripsi*. Bogor: IPB.
- Sarimai., Ratnawulan., Ramli. dan Fauzi. 2016. Pengaruh Waktu Milling terhadap dan Ukuran Butir Forsterite (Mg_2SiO_4) Mineral Serpentin dari Kabupaten Solok Selatan. *Pillar of Physics*. 8(10): 65-72.
- Schaffer, G. B. and McCormick, P. G. 1990. Displacement Reactions during Mechanical Alloying. *Metallurgical Transactions A*. 21(10): 2789-2794.
- Setiabudi, A., Hardian, R. dan Muzakir, A. 2012. *Karakterisasi Material Prinsip dan Aplikasinya Dalam Penelitian Kimia*. Bandung: UPI Press.
- Stewart, M. and Lewis, O. T. 2013. *Materials of Construction, Search*. Amsterdam: Elsevier.
- Ströbel, R., Garche, J., Moseley, P. T., Jorissen, L. and Wolf, G. 2006. Hydrogen Storage by Carbon Materials. *Journal of Power Sources*. 159(2): 781-801.
- Suci, F. C. 2015. Adsorpsi Hidrogen Pada Material Karbon Tertemplat Zeolit-Y dengan Aktivasi Hydrogen Adsorption on K_2CO_3 Activated Zeolite-Y Templated Carbon. *Tesis*. Surabaya: ITS.
- Suparjo. 2011. Analisa Sifat Fisis dan Mekanis Pulley Hasil Coran dengan Bahan Tambah Piston Bekas. *Teknika*, XXXII(1): 25-30.
- Suryanarayana, C., Ivanov, E. and Boldyrev, V. V. 2001. The Science and Technology of Mechanical Alloying. *Materials Science and Engineering*. 306(1): 151-158.
- Suwarno, H. dan Adi, A. 2009. Tinjauan Mikrostruktur, Struktur Kristal, dan Kristalit Pertumbuhan Fasa Mg_2Al_3 Hasil Mechanical Alloying. *Urania*. 15(1): 11-19.
- Suwarno, H., Insani, A. and Adi, W. A. 2007. The X-Ray Diffraction Analyses on The Mechanical ALloying of The Mg_2Ni Formation. *Jurnal Teknik Bahan Nuklir*. 3(2): 74-85.
- Takacs, L. 2002. Self-sustaining Reactions Induced by Ball Milling. *Progress in Materials Science*. 47(4): 355-414.
- Tekekaya, H. S. 2019. Synthesis and Structural Characterization of Bulk and Nanoalloys of Ni-B Binary Systems. *Tesis*. Ankara: Middle East Technical University.

- Ursúa, A., Gandía, L. M. and Sanchis, P. 2012. Hydrogen Production from Water Electrolysis: Current Status and Future Trends. *Proceedings of the IEEE*. 100(2): 410-426.
- Walker, G. 2010. *Solid-state hydrogen storage, Solid-state hydrogen storage*. New York: Woodhead Publishing Limited.
- Wang, J., Li, Y. and Liu, P. 2003. XRD and TEM Analysis on the Fe₃Al/18-8 Stainless Steel Diffusion Bonded Interface. *Materials Letters*. 57(26–27): 4323–4327.
- Yang, G.-J., Suo, X.-K. and Li, G.-R. 2019. *Introduction to Advanced Micro-Nano Coating Materials and Thermal Spray, Advanced Nanomaterials and Coatings by Thermal Spray*. China: Elsevier Inc.
- Yousaf, M., Iqbal, J. and Ajmal, M. 2011. Variables Affecting Growth and Morphology of the Intermetallic Layer (Fe₂Al₅). *Materials Characterization*. 62(5): 517–525.
- Yusariarta, A. W. dan Purwaningsih, H. 2015. Analisa Penambahan Aluminium (Al) terhadap Sifat Hidrogenasi Paduan Mg_{2-x}Al_xNi Hasil Sintesa Mechanical Milling dan Heat Treatment. *Jurnal Teknik ITS*. 4(1): 72-77.
- Zamanzade, M., Barnoush, A. and Motz, H. 2016. A review on the Properties of Iron Aluminide Intermetallics. *Crystals*. 6(1): 1–29.