

HALAMAN JUDUL

**STRUKTUR, KEKERASAN, DAN KETAHANAN OKSIDASI LAPISAN Fe-Mn-Al YANG DIDEPOSISIKAN PADA BAJA KARBON RENDAH DENGAN
TEKNIK *MECHANICAL ALLOYING***

*STRUCTURE, HARDNESS, AND RESISTANCE OXIDATION OF Fe-Mn-Al
COATINGS PREPARED ON LOW CARBON STEEL BY A MECHANICAL
ALLOYING TECHNIQUE*

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Persyaratan Untuk Mencapai Derajat Strata-1
Pada Prodi Teknik Mesin Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Yogyakarta



Disusun Oleh :

ABDI LIMAM

2013 013 0244

PROGRAM STUDI S-1 TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH YOGYAKARTA

**STRUKTUR, KEKERASAN, DAN KETAHANAN OKSIDASI LAPISAN Fe-Mn-AI YANG DIDEPOSISIKAN PADA BAJA KARBON RENDAH DENGAN
TEKNIK MECHANICAL ALLOYING**

Tugas Akhir

Diajukan untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik (S.T)

Oleh

Abdi Limam

NIM : 2013 013 0244

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I



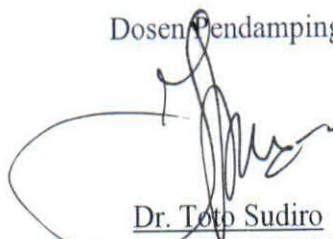
Dr. Ir. Harini Sosiati, M.Eng
NIK. 19591220 201510 123088

Dosen Pembimbing II



Aris Widyo Nugroho, S.T., M.T., Ph.D
NIK. 1970301 199509 123022


Dosen Pendamping



Dr. Toto Sudiro
NIP. 198110204 200502 1 001

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Mesin
Universitas Muhammadiyah
Yogyakarta



Novi Caroko, S.T., M.Eng.
NIP. 19791113 200501 1 001

Kepala Pusat Penelitian Fisika
Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia



Dr. Bambang Widyatmoko, M.Eng.
NIP. 19620430 198803 1 001

PERNYATAAN

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi/tugas akhir berjudul **"Struktur, Kekerasan, dan Ketahanan Oksidasi Lapisan Fe-Mn-Al yang dideposisikan pada Baja Karbon Rendah dengan Teknik *Mechanical Alloying*"** ini adalah asli hasil karya saya dan tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di Perguruan Tinggi dan sepengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau dipublikasikan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis disebutkan sumbernya dalam naskah dan dalam daftar pustaka.

HALAMAN MOTTO

Janganlah kau mengatakan sesuatu yang tidak kau kerjakan. Sesungguhnya itu sangat dibenci di sisi Allah S.W.T

(Q.S As-Saff : 2-3)

Sebaik baik-baiknya manusia adalah manusia yang bermanfaat bagi manusia lainnya.

(Rasulullah Muhammad SAW)

Perjalanan sejauh 1000 mil dimulai dengan 1 langkah

(Pepatah Cina Kuno)

Hidup itu seperti naik sepeda. Agar tetap seimbang kau harus terus bergerak.

(Albert Einstein)

HALAMAN PERSEMBAHAN

Karya ini saya persembahkan kepada

☞ Kedua orang tuaku ☞

Sebuah tanda bakti, hormat, dan rasa terima kasih yang tiada terhingga kupersembahkan dengan karya sederhana ini, jasa yang tiada mungkin dapat kubalas hanya dengan selembar kertas yang bertuliskan kata cinta dan persembahan. Tiada kata yang bisa menggantikan segala rasa, usaha, dan biaya yang telah dicurahkan untuk menyelesaikan kuliahku.

☞ Adik - adikku ☞

Nur Alim, Muhammad Rizky, dan Fahri Prayetno Wijaya. Jadikan ini motivasi dan semangat. Jadilah lebih baik dariku

☞ Perempuan yang telah membantu membentuk pribadiku ☞

Rini Suprianti. Semoga kelak kita dipertemukan dalam surga-nya. Amin.

☞ Dosen Pembimbingku ☞

Ibu Dr. Harini Sosiati, Ph.D dan Bapak Ir. Aris Widyo Nugroho, M.T., Ph.D selaku dosen pembimbing tugas akhir saya. Bapak Dr. Toto Sudiro dan Bapak Didik Aryanto, Ms.c selaku pembimbing lapangan. Terima kasih pak, bu. Saya sudah dinasehati, diajari, dibimbing selama ini. Saya tidak akan lupa atas bantuan dan kesabaran bapak, ibu semua.

☞ Sahabat-sahabatku ☞

Segelas kopi untuk kalian yang selalu menghangatkan hidupku, memberi warna dan cerita di empat tahun ini. Tanpa kalian semua, ini akan jauh lebih berat untuk diselesaikan. Akan selalu terkenang selamanya. Terima kasih.

HMM UMY, Salam Solidarity Forever

HMI, Yakin Usaha Sampai

Hore-hore Kelas E 2013, tetap semangat, dan jaga kesolid'an

☞ Yang Terakhir ☞

Untuk ribuan tujuan yang harus dicapai, untuk jutaan impian yang akan dikejar, untuk sebuah pengharapan, agar hidup jauh lebih bermakna, hidup tanpa mimpi ibarat arus sungai mengalir tanpa tujuan.

Hidup adalah proses. Hidup adalah belajar

Tanpa batas umur. Tanpa ada kata tua

Jatuh berdiri lagi. Kalah mencoba lagi. Gagal bangkit lagi

“NEVER GIVE UP”

Sampai Allah SWT berkata “WAKTUNYA PULANG”

Hanya sebuah karya kecil dan untaian kata-kata ini yang dapat kupersembahkan kepada kalian semua. Terima kasih beribu terima kasih kuucapkan.

Atas segala kekhilafan salah dan kekurangku, kurendahkan hati serta diri memohon beribu-ribu kata maaf tercurah

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Assalamualaikum Wr. Wb.

Alhamdulillahirabbil'alamin, puji dan syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan anugerah-Nya, sehingga penyusunan tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Dalam penyusunan tugas akhir ini banyak masukan, bimbingan, dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu dengan segala kerendahan hati menyampaikan terima kasih kepada:

- Kedua orang tua, dan keluarga yang telah mendorong, memotivasi dengan penuh keikhlasan dan rasa cinta. Teristimewa kepada kakek.
- Bapak Dr. Ir. Gunawan Budiyanto, M.P. Selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Bapak Jazaul Ikhsan, S.T., M.T., Ph.D. Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Bapak Novi Caroko, S.T., M.Eng. selaku Ketua Program Studi S-1 Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Ibu Dr. Harini Sosiati dan Bapak Ir. Aris Widyo Nugroho, M.T., Ph.D selaku dosen pembimbing yang selalu bersedia membimbing, mengarahkan, dan mendukung dalam penyelesaian tugas akhir ini.
- Bapak Dr. Bambang Widyatmoko, M.Eng selaku Kepala P2F-LIPI yang telah memberikan kesempatan kepada penulis melaksanakan tugas akhir.
- Bapak Dr. Toto Sudiro selaku pembimbing lapangan yang telah membimbing saya dengan sepenuh hati.
- Bapak Didik Aryanto, M.Sc, Bapak Ahmad, Saudara Ciswandi S.Si yang telah membantu dan memberikan saran selama proses penelitian

- Saudara-saudara saya di negeri rantau. Fabio, Fauzi, Bembi, Danu, Gopal, Rifa, Faisal, Tunggul. Serta seluruh pasukan hore-hore.
- Teman-teman seperjuangan di dalam HMM UMY. Pepi, Riza, Kurniady, Zefri, Danu, Nala, Wahid, Ina, Taufik, Intan, Apri, Ikhsan, Rori dan masih banyak lagi yang belum saya sebutkan. Semoga kita semua menjadi orang hebat.
- Keluarga Besar HMI Eksakta UMY, HMI Korkom UMY, HMI Cabang Yogyakarta, Partai Amanat Mahasiswa, HMM UMY, HMM ITI, BEM UMY, KMFT UMY, KKN Tematik 161.

Dalam penulisan tugas akhir ini tidak luput dari kesalahan, karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca. Akhir kata, semoga Allah SWT. membalas kebaikan dari semua pihak dan semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi pembaca, dan lebih khusus bagi penulis.

Wassalamualakum Wr. Wb.

Yogyakarta, Mei 2017
Penulis,

Abdi Limam

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERNYATAAN	iii
HALAMAN MOTTO	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	v
INTISARI	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xviii
DAFTAR LAMPIRAN	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Batasan Masalah	4
1.4. Tujuan Penelitian	5
1.5. Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	7
2.1. Tinjauan Pustaka	7
2.2. Dasar Teori	8
2.2.1. Baja	8
2.2.2. Baja Karbon	11
a. Baja Karbon Rendah	12

b.	Baja Karbon Sedang	12
c.	Baja Karbon Tinggi	13
2.2.3.	Oksidasi Temperatur Tinggi	13
2.2.4.	Ketahanan Oksidasi Baja Karbon Rendah	15
2.2.5.	Upaya Peningkatan Ketahanan Oksidasi	16
a.	<i>Alloy Enrichment</i>	17
b.	Pelapisan	17
2.2.6.	Teknik Pelapisan	17
a.	<i>Pack Cementation</i>	17
b.	<i>Thermal Spray</i>	18
c.	<i>Mechanical Alloying</i>	19
2.2.7.	Material Pelapis	22
a.	Aluminium	22
b.	Mangan	23
c.	Ferro	26
2.2.8.	<i>Heat Treatment</i>	26
a.	<i>Annealing</i>	27
b.	<i>Hardening</i>	28
c.	Tempering	28
2.2.9.	Instrumen Analitik	28
a.	<i>X-Ray Diffraction</i>	28
b.	<i>Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive X-ray</i> .	30
c.	<i>Automatic Microhardness Tester</i>	33
d.	<i>Muffle Furnace</i>	36

BAB III METODE PENELITIAN

3.1.	Waktu dan Tempat Penelitian	38
------	-----------------------------------	----

3.2.	Alat dan Bahan	38
------	----------------------	----

3.2.1.	Alat	38
--------	------------	----

3.2.2.	Bahan	39
--------	-------------	----

3.3.	Variabel Penelitian	40
------	---------------------------	----

3.4. Tahapan Penelitian.....	40
3.4.1. Persiapan Bahan Baku	40
3.4.2. Preparasi Sampel	41
a. Proses Pengamplasan dan Pembersihan Substrat	41
b. Persiapan <i>Jar Mill</i> dan <i>Ball Mill</i>	43
c. Penghalusan <i>Lump Ferro Manganese</i>	43
3.4.3. Preparasi <i>Mechanical Alloying</i>	44
a. <i>Mixing</i> Serbuk	44
b. Pelapisan Serbuk Fe-Mn-Al Pada Baja Karbon Rendah	45
3.4.4. Proses <i>Heat Treatment</i>	46
3.4.5. Karakterisasi dan Pengujian Sampel	47
a. Karakterisasi Sampel Menggunakan <i>Optical Microscope</i>	47
b. Karakterisasi Sampel Menggunakan <i>Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive X-ray</i>	49
c. Karakterisasi Sampel Menggunakan <i>X-Ray Diffraction</i>	50
d. Pengujian Kekerasan Lapisan Menggunakan <i>Automatic Microharness Tester</i>	51
e. Pengujian Oksidasi Temperatur Tinggi Menggunakan <i>Muffle Furnace</i>	52
3.5. Diagram Alir Penelitian	53
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	55
4.1. Analisis Struktur Mikro Menggunakan <i>Optical Microscope</i> Lapisan Fe-Mn-Al pada Baja Karbon Rendah Sebelum <i>Heat Treatment</i>	55
4.2. Analisis Struktur Mikro Menggunakan <i>Optical Microscope</i> Lapisan Fe-Mn-Al pada Baja Karbon Rendah Sebelum <i>Heat Treatment</i>	56
4.3. Analisis Hasil Karakterisasi Menggunakan SEM pada Lapisan 13.8Fe-53.2Mn-Al Sebelum <i>Heat Treatment</i>	57
4.4. Analisis Hasil <i>Mapping</i> EDX pada Lapisan 13.8Fe-53.2Mn-Al Sebelum <i>Heat Treatment</i>	58
4.5. Analisis Hasil Karakterisasi Menggunakan SEM pada Lapisan	

53.2Fe-13.8Mn-Al Sebelum <i>Heat Treatment</i>	59
4.6. Analisis Hasil <i>Mapping</i> EDX pada Lapisan 53.2Fe-13.8Mn-Al Sebelum <i>Heat Treatment</i>	60
4.7. Analisis Hasil Karakterisasi Menggunakan SEM pada Lapisan 13.8Fe-53.2Mn-Al Sesudah <i>Heat Treatment</i>	61
4.8. Analisis Hasil <i>Mapping</i> EDX pada Lapisan 13.8Fe-53.2Mn-Al Sesudah <i>Heat Treatment</i>	62
4.9. Analisis Hasil Karakterisasi Menggunakan SEM pada Lapisan 53.2Fe-13.8Mn-Al Sebelum <i>Heat Treatment</i>	63
4.10. Analisis Hasil <i>Mapping</i> EDX pada Lapisan 53.2Fe-13.8Mn-Al Sebelum <i>Heat Treatment</i>	64
4.11. Analisis XRD pada Baja Karbon Rendah	65
4.12. Analisis XRD pada Lapisan Fe-Mn-Al Sebelum <i>Heat Treatment</i> ...	66
4.13. Analisis XRD pada Lapisan Fe-Mn-Al Sesudah <i>Heat Treatment</i>	67
4.14. Analisis Hasil <i>Vickers Hardness</i>	68
4.15. Analisis Ketahanan Oksidasi Temperatur Tinggi	69
BAB V PENUTUP	71
5.1. Kesimpulan	71
5.2. Saran	72
DAFTAR PUSTAKA	73
LAMPIRAN	78

DAFTAR GAMBAR

BAB I PENDAHULUAN	1
Gambar 1.1. Kerusakan material yang diakibatkan oksidasi	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	7
Gambar 2.1. Diagram kesetimbangan Fe-Fe ₃ -C	9
Gambar 2.2. Ellingham diagram	15
Gambar 2.3. Hasil SEM pada proses oksidasi baja karbon rendah (a) pada permukaan, (b) pada <i>cross section</i>	16
Gambar 2.4. Ilustrasi proses pelapisan menggunakan teknik <i>pack cementation</i>	18
Gambar 2.5. Ilustrasi proses pelapisan menggunakan teknik <i>thermal spray</i>	19
Gambar 2.6. Ilustrasi proses pelapisan menggunakan teknik <i>mechanical alloying</i>	19
Gambar 2.7. Serbuk aluminium	23
Gambar 2.8. Serbuk mangan	24
Gambar 2.9. Diagram fase ekuilibrium Mn-Fe	25
Gambar 2.10. Aktivitas Mn-Fe dalam paduan cair	25
Gambar 2.11. Serbuk ferro	26
Gambar 2.12. Skema cara kerja XRD	29
Gambar 2.13. Difraksi sinar-X	30
Gambar 2.14. Prinsip kerja SEM	31
Gambar 2.15. Alat uji kekerasan universal dengan metode indentasi permukaan	34
Gambar 2.16. Skema prinsip indentasi dengan metode <i>vickers</i>	34
Gambar 2.17. Tipe-tipe lekukan piramid intan (a) lekukan yang sempurna, (b) lekukan bantal jarum, (c) lekukan berbentuk tong	35

BAB III METODE PENELITIAN	38
Gambar 3.1. (a) Substrat baja karbon rendah, (b) <i>lump</i> FeMn, (c) serbuk Fe, (d) serbuk Al	41
Gambar 3.2. Substrat yang telah diampelas	42
Gambar 3.3. Proses pembersihan menggunakan <i>ultrasonic cleaner</i>	42
Gambar 3.4. (a) <i>Jar mill</i> , (b) <i>ball mill</i>	43
Gambar 3.5. Serbuk <i>ferro manganese</i> yang telah dihaluskan	44
Gambar 3.6. <i>Shaker mill</i> PPF-UG	45
Gambar 3.7. <i>Vacuum Furnace</i> XD-1400 VF	46
Gambar 3.8. Sampel yang telah di- <i>mounting</i>	47
Gambar 3.9. Alat pemotong sampel	48
Gambar 3.10. <i>Optical Microscope</i> (Best Scope)	48
Gambar 3.11. (a) <i>Coater</i> , (b) SEM-EDX (Hitachi-SU 3500)	49
Gambar 3.12. <i>X-ray diffraction</i> (RIGAKU-SmartLab)	50
Gambar 3.13. <i>Automatic microhardness tester</i> (Leco-LM 100 AT)	51
Gambar 3.14. (a) <i>Ceramic crucible</i> yang berisikan sampel, (b) proses memasukkan <i>ceramic crucible</i> ke dalam <i>muffle furnace</i>	52
Gambar 3.15. Diagram alir penelitian	53

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	55
Gambar 4.1. Struktur mikro lapisan Fe-Mn-Al sebelum <i>heat treatment</i> (a) 13.8Fe-53.2Mn-Al, (b) 33.6Fe-33.6Mn-Al, (c) 53.2Fe-13.8Mn-Al (at%)	55
Gambar 4.2. Struktur mikro lapisan Fe-Mn-Al sesudah <i>heat treatment</i> (a) 13.8Fe-53.2Mn-Al, (b) 33.6Fe-33.6Mn-Al, (c) 53.2Fe-13.8Mn-Al (at%)	56
Gambar 4.3. <i>Cross-sectional</i> lapisan 13.8Fe-53.2Mn-Al sebelum <i>heat treatment</i>	57
Gambar 4.4. Hasil EDX <i>elemental mapping</i> pada lapisan 13.8Fe-53.2Mn-Al sebelum <i>heat treatment</i> (a) BSE, (b) Fe, (c) Mn, (d) Al, (e) O	58

Gambar 4.5.	<i>Cross-sectional</i> lapisan 53.2Fe-13.8Mn-Al sebelum <i>heat treatment</i>	59
Gambar 4.6.	Hasil EDX <i>elemental mapping</i> pada lapisan 53.2Fe-13.8Mn-Al sebelum <i>heat treatment</i> (a) BSE, (b) Fe, (c) Mn, (d) Al, (e) O	60
Gambar 4.7.	<i>Cross-sectional</i> lapisan 13.8Fe-53.2Mn-Al sesudah <i>heat treatment</i>	61
Gambar 4.8.	Hasil EDX <i>elemental mapping</i> pada lapisan 13.8Fe-53.2Mn-Al sesudah <i>heat treatment</i> (a) BSE, (b) Fe, (c) Mn, (d) Al, (e) O	62
Gambar 4.9.	<i>Cross-sectional</i> lapisan 53.2Fe-13.8Mn-Al sesudah <i>heat treatment</i>	63
Gambar 4.10.	Hasil EDX <i>elemental mapping</i> pada lapisan 53.2Fe-13.8Mn-Al sesudah <i>heat treatment</i> (a) BSE, (b) Fe, (c) Mn, (d) Al, (e) O	64
Gambar 4.11.	Pola difraksi sinar-X dari substrat baja karbon rendah	65
Gambar 4.12.	Pola difraksi sinar-X dari lapisan pada baja karbon rendah sebelum <i>heat treatment</i> (a) 13.8Fe-53.2Mn-Al, (b) 33.6Fe-33.6Mn-Al, (c) 53.2Fe-13.8Mn-Al (at%)	66
Gambar 4.14.	Pola difraksi sinar-X dari lapisan pada baja karbon rendah sesudah <i>heat treatment</i> (a) 13.8Fe-53.2Mn-Al, (b) 33.6Fe-33.6Mn-Al, (c) 53.2Fe-13.8Mn-Al (at%)	67
Gambar 4.15.	Hasil <i>vickers hardness</i>	68
Gambar 4.16.	Kurva penambahan massa dari baja karbon rendah, lapisan Fe-Mn-Al dengan dan tanpa <i>heat treatment</i> setelah teroksidasi pada temperatur 800°C	70

DAFTAR TABEL

BAB III METODE PENELITIAN	38
Tabel 3.1. Komposisi <i>ferro manganese</i>	39
Tabel 3.2. Variabel komposisi serbuk Fe-Mn-Al	44

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

A	= luas penampang (mm)
Al	= Aluminium
Al ₂ O ₃	= Alumina
at%	= persentase atomic
BCC	= Body Centered Cubic
C	= <i>Carbon</i> (karbon)
Ce	= Cerium
CO ₂	= <i>Carbon dioxide</i> (karbon dioksida)
Cr	= <i>Chromium</i> (krom)
CRT	= <i>Cathode Ray Tube</i>
Cr ₂ O ₃	= <i>Chromium (III) oxide</i>
d	= jarak antar bidang kristal
d ₁	= panjang diagonal 1 (mm)
d ₂	= panjang diagonal 2 (mm)
EDX	= <i>Energy Dispersive X-ray</i>
FCC	= Face Centered Cubic
Fe	= <i>Ferro</i> (besi)
Fe ₂ O ₃	= <i>Iron (III) oxide</i>
Fe ₃ C	= <i>Cementite</i>
Fe ₃ O ₄	= <i>Iron (II, III) oxide</i>
g	= <i>gram</i>
gf	= <i>gram force</i>
H	= Hidrogen
HCl	= <i>Hydrogen chloride</i>
HV	= <i>Hardness of Vickers</i> (kgf/mm ²)
H ₂ O	= <i>Hidrogen oxide</i> (air)
kgf	= <i>kilogram force</i>
kW	= <i>kilo Watt</i>
kV	= <i>kilo Volt</i>

mA	= <i>mili Ampere</i>
mm	= <i>milimeter</i>
Mn	= <i>Manganese (mangan)</i>
MnO ₂	= <i>Manganese dioxide</i>
MW	= <i>Mega Watt</i>
m ₀	= massa sebelum pengujian oksidasi (g)
m ₁	= massa sesudah pengujian oksidasi (g)
n	= urutan difraksi
N	= Nitrogen
nm	= nanometer
O	= <i>Oxygen (unsur)</i>
OM	= <i>Optical Microscope</i>
O ₂	= <i>Oxygen (gas)</i>
P	= <i>Phosporus (fosfor)</i>
P	= tekanan
PLN	= Perusahaan Listrik Negara
PLTU	= Pembangkit Listrik Tenaga Uap
PPF-UG	= Pusat Penelitian Fisika – <i>Ultimate Gravity</i>
Psi	= <i>pounds per square inch</i>
PT	= Perseroan Terbatas
P2E-I IPI	= Pusat Penelitian Fisika – Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia

α	= <i>alpha</i>
γ	= <i>gamma</i>
δ	= <i>delta</i>
λ	= panjang gelombang sinar-X
θ	= sudut difraksi ($^{\circ}$)

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1. Surat keterangan penelitian di Pusat Penelitian Fisika – Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
- Lampiran 2. Perhitungan variasi berat serbuk
- Lampiran 3. Sampel setelah proses *mechanical alloying* dan *heat treatment*
- Lampiran 4. Perhitungan ketebalan lapisan
- Lampiran 5. Hasil karakterisasi *x-ray diffraction*
- Lampiran 6. Perhitungan kekerasan permukaan sampel
- Lampiran 7. Perhitungan pengujian oksidasi
- Lampiran 8. Sampel setelah proses pengujian oksidasi