



UNIVERSITAS PERTAHANAN REPUBLIK INDONESIA

**PENGEMBANGAN MATERIAL BERBASIS Mo-Si-AI UNTUK
APLIKASI BILAH TURBIN PESAWAT GUNA Mendukung
INDUSTRI PERTAHANAN NASIONAL**

NI MADE KESUMA ASTUTI INDRIANINGSIH PUTRI

120200404008

Tesis yang Ditulis untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan dalam
Mendapatkan Gelar Magister Pertahanan


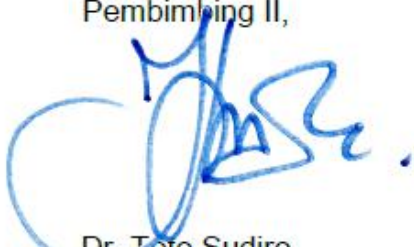
**FAKULTAS TEKNOLOGI PERTAHANAN
PROGRAM STUDI TEKNOLOGI DAYA GERAK**


BOGOR

2022




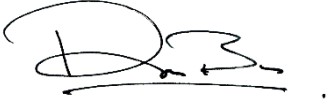

LEMBAR PERSETUJUAN TESIS

Nama	: Ni Made Kesuma Astuti Indrianingsih Putri
NIM	: 120200404008
Program Studi	: Teknologi Daya Gerak
Fakultas	: Teknologi Pertahanan
Judul Tesis	: Pengembangan Material Berbasis Mo-Si-Al untuk Aplikasi Bilah Turbin Pesawat Guna Mendukung Industri Pertahanan Nasional

Pembimbing I,  Dr. Sovian Aritonang, S.Si., M.Si Kolonel Kes. NRP 519726 Tanggal : 4 Februari 2022	Pembimbing II,  Dr. Toto Sudiro Peneliti Ahli Madya Tanggal : 4 Februari 2022
--	--

Mengetahui Dekan Fakultas Teknologi Pertahanan  Dr. Kasih Prihantoro, S.E., M.M., M.Tr (Han), Laksamana Muda TNI Tanggal : 5 Februari 2022
--

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Nama	: Ni Made Kesuma Astuti Indrianingsih Putri		
NIM	: 120200404008		
Program Studi	: Teknologi Daya Gerak		
Fakultas	: Teknologi Pertahanan		
Judul Tesis	: Pengembangan Material Berbasis Mo-Si-Al untuk Aplikasi Bilah Turbin Pesawat Guna Mendukung Industri Pertahanan Nasional.		
No.	Nama	Tanda Tangan	Tanggal
1.	Pembimbing I : Dr. Sovian Aritonang, S.Si., M.Si Kolonel Kes. NRP 519726		22 Februari 2022
2.	Pembimbing II : Dr. Toto Sudiro Peneliti Ahli Madya NIP 198102042005021001		22 Februari 2022
3.	Penguji I : Dr. Timbul Siahaan		22 Februari 2022
4.	Penguji II : Ir. Romie Oktovianus Bura, Beng.(Hons), MRAS, Ph.D., CIQnR, CIQaR Penata Tk. I III/d NIP 197310062006041001		22 Februari 2022
5.	Penguji III : Dr. Ir. Erzi Agson Gani, M. Eng		21/02/2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam tesis ini tidak terdapat karya atau bagian karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan jenjang apapun di suatu Perguruan Tinggi; dan sepanjang sepengetahuan saya juga tidak terdapat istilah, frasa, kalimat, paragraf, subbab atau bab dari karya yang pernah ditulis atau diterbitkan; kecuali yang secara tertulis diajukan dalam naskah ini dan disebutkan dalam Daftar Referensi.

Apabila dikemudian hari terbukti bahwa terdapat plagiat dalam tesis ini, saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan peraturan/undang-undang yang berlaku.

Bogor, 22 Februari 2022



Ni Made Kesuma Astuti Indrianingsih Putri

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yesus Kristus juru selamat manusia, karena berkat kasih dan karunia-Nya penyusunan tesis dengan judul : **“Pengembangan Material Berbasis Mo-Si-Al untuk Aplikasi Bilah Turbin Pesawat Guna Mendukung Industri Pertahanan Nasional”** dapat diselesaikan dengan baik.

Penyusunan tesis ini diperuntukan sebagai salah satu syarat dalam memperoleh gelar Magister pada Program Studi Teknologi Daya Gerak Fakultas Teknologi Pertahanan Universitas Pertahanan Republik Indonesia.

Penyusunan tesis ini dapat diselesaikan berkat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Untuk itu, pada kesempatan ini peneliti mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Laksamana Madya TNI Prof. Dr.Ir. Amarulla Octavian, S.T., M.Sc., DESD., CIQnR., CIQaR., IPU selaku rektor Universitas Pertahanan RI
2. Bapak Laksamana Muda TNI Dr. Kasih Prihantoro, S.E., M.M., M.Tr(Han) selaku dekan Fakultas Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan RI
3. Dr. Rike Yudianti selaku Kepala Pusat Riset Fisika-BRIN dan Dr. Rifki Sadikin selaku Direktur Laboratorium dan Fasilitas Riset BRIN
4. Bapak Kol. Kes Dr. Sovian Aritonang S.Si., M. Si., selaku dosen pembimbing I
5. Bapak Dr. Toto Sudiro, selaku dosen pembimbing II
6. Bapak Kol. Arh Dr. R. Djoko Andreas Navalino, S.IP., M.AB selaku sekretaris program studi Teknologi Daya Gerak beserta seluruh dosen dan staf Universitas Pertahanan RI

7. Suami terkasih Wasinton Dodie Naek Parulian Pangaribuan dan para buah hati tercinta Tesalonika Sarasvati Shyntyauli Pangaribuan, Keana Varalakhsmi Ronauli Pangaribuan dan Revanya Nareswari Siholmarito Pangaribuan atas doa dan dukungan yang luar biasa selama penulis menyelesaikan kuliah dan tesis ini.
8. Rekan-rekan makasiswa Prodi Teknologi Daya Gerak Fakultas Teknologi Pertahanan Universitas Pertahanan RI Cohort 4 : Pak Akil, Mas Aldo, Mas Cahyo, Pak Chardes, Mas Fathur, Mas Joshua, Mba Luk'lu, Pak Rosihan dan Pak Uman. "Badai Pasti Berlalu" tetap semangat.
9. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Kiranya semua kebaikan, doa dan dukungan yang diberikan kepada penulis dibalas oleh-Nya dan sehat selalu tetap bersemangat untuk kita semua.

Terlepas dari semua itu, penulis menyadari bahwa tesis ini masih perlu penyempurnaan, sehingga dengan segala kerendahan hati penulis sangat terbuka apabila terdapat kritik, masukan dan saran konstruktif demi semakin menjadi sempurnanya tesis ini.

Sebagai penutup, kiranya tesis ini dapat memberi manfaat utamanya dalam perkembangan ilmu pertahanan, khususnya terkait material maju, baik dalam penelitian selanjutnya maupun dalam pengaplikasian yang melibatkan *stakeholder* terkait dalam upaya bersama membangun kemandirian industri pertahanan nasional yang maju, mandiri dan berdaya saing.

Penulis

Ni Made Kesuma Astuti Indrianingsih Putri

ABSTRAK

PENGEMBANGAN MATERIAL BERBASIS Mo-Si-Al UNTUK APLIKASI BILAH TURBIN PESAWAT GUNA Mendukung Industri Pertahanan Nasional Ni Made Kesuma Astuti Indrianingsih Putri

Alutsista udara guna mendukung misi kemanusiaan dan penanganan bencana di tanah air didominasi dengan armada pesawat dengan tipe mesin turboprop. Di lain sisi pengurangan emisi lingkungan di udara erat kaitannya dengan efisiensi suatu mesin pesawat, dimana semakin tinggi temperatur pembakaran maka akan semakin efisien dengan emisi bahan bakar yang minimal. Bilah turbin merupakan salah satu komponen mesin pesawat yang beroperasi pada temperatur tinggi yakni 900°C – 1200°C . Sehingga bilah turbin pesawat diharapkan semakin memiliki ketahanan secara sifat fisik serta oksidasi temperatur tinggi. Penelitian ini melakukan pengembangan material baru yang menjadi fundamental dalam industri pertahanan dengan berfokus pada aplikasi bilah turbin pesawat bertipe mesin turboprop, dimana memiliki *nilai turbine inlet temperature* (TIT) pada 1095°C dengan pemaduan material berbasis Mo-Si-Al. Guna meningkatkan ketahanan oksidasi material MoSi_2 yang memiliki titik leleh tinggi yakni 2030°C , maka dilakukan pemaduan dengan unsur Aluminium (Al) yang memiliki kemampuan untuk membentuk lapisan pelindung oksidasi dalam bentuk protektif alumina (Al_2O_3). Terdapat 4 (empat) komposisi paduan MoSi_2 mengandung 0, 1, 3, dan 5 % berat Al yang disiapkan dengan teknik pemaduan mekanis dan *spark plasma sintering* (SPS). Dari hasil analisis pengujian yang meliputi uji densitas, uji kekerasan dan uji oksidasi temperatur tinggi yakni pada temperatur 1100°C , direkomendasikan bahwa material MoSi_2 dengan paduan 3 % berat Al merupakan komposisi paduan yang paling menjanjikan karena memiliki kekerasan yang tinggi dengan densitas yang rendah, serta memiliki ketahanan oksidasi terbaik pada temperatur 1100°C .

Kata kunci : Bilah Turbin, Industri Pertahanan, Mo-Si-Al, *Spark Plasma Sintering*, Densitas, Kekerasan, Oksidasi

ABSTRACT**DEVELOPMENT OF Mo-Si-Al BASED MATERIALS
FOR AIRCRAFT TURBINE BLADE APPLICATIONS
TO SUPPORT THE NATIONAL DEFENSE INDUSTRY*****Ni Made Kesuma Astuti Indrianingsih Putri***

Air defense equipment to support humanitarian and disaster management in this country is dominated by a fleet of aircraft with turboprop engine types. On the other hand, reducing environmental emissions in the air is related to the efficiency of an aircraft engine, where the higher combustion temperature, the more efficient with minimal fuel emissions. The turbine blade is one of the components of aircraft engines that operate at high temperatures (900°C-1200°C). So that turbine blades are expected to have more physical resistance and high temperature oxidation. This study develops new materials that are fundamental in the defense industry by focusing on the application of aircraft turbine blades with a turboprop engine type, which has a turbine inlet temperature (TIT) value of 1095°C, with the combination of Mo-Si-Al based materials. In order to increase the oxidation resistance of MoSi₂ material which has a high melting point of 2030°C, it is alloyed with Aluminum (Al) which has the ability to form an oxidation protective layer called protective alumina (Al₂O₃). There are 4 composition MoSi₂ alloy containing 0, 1, 3, and 5 wt% Al prepared by mechanical alloying and spark plasma sintering (SPS) techniques. From the results of the test analysis which includes density, hardness and high temperature oxidation at temperature of 1100°C, it is recommended that the MoSi₂ material with alloy of 3% by weight Al is the most promising alloy composition due to it has high hardness with low density, and has high resistance of oxidation at temperature of 1100°C.

Keyword : Blade Turbine, Defense Industry, Mo-Si-Al, Spark Plasma Sintering, Density, Hardness, Oxidation

DAFTAR ISI

PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vii
<i>ABSTRACT</i>	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GRAFIK.....	xiv
BAB 1	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah	5
1.3 Pembatasan Masalah	6
1.4 Rumusan Masalah.....	6
1.5 Tujuan Penelitian.....	7
1.6 Manfaat Penelitian.....	7
1.6.1 Manfaat Teoritis	7
1.6.2 Manfaat Praktis	8
BAB 2	8
TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 Landasan Teori	8
2.1.1 <i>Pertahanan Negara</i>	8
2.1.2 Industri Pertahanan	9
2.1.3 <i>Turbin Gas Pesawat</i>	11
2.1.3.1 <i>Bilah Turbin Gas Pesawat</i>	12
2.1.4 <i>Advance Material</i>	14
2.1.4.1 <i>Superalloy Bilah Turbin</i>	14
2.1.5 <i>Material Molibdenum (Mo)</i>	16
2.1.6 <i>Material Silikon (Si)</i>	16
2.1.7 <i>Material Aluminium (Al)</i>	17
2.1.8 <i>Material Molibdenum Disilicida (MoSi₂)</i>	18
2.1.9 <i>Mechanical Alloying (MA)</i>	19

2.1.10 Spark Plasma Sintering (SPS).....	20
2.1.11 Archimedes Density.....	25
2.1.12 Vickers Hardness.....	26
2.1.13 XRD (X-Ray Diffraction).....	28
2.1.14 SEM-EDS dan FESEM-EDS.....	30
2.1.14 Oksidasi Temperatur Tinggi.....	34
2.2 Hasil Penelitian Terdahulu.....	36
2.3 Kerangka Pemikiran.....	41
BAB 3	50
METODOLOGI PENELITIAN	50
3.1 Metode dan Desain Penelitian.....	50
3.1.1 Metode Penelitian.....	50
3.1.2 Desain Penelitian.....	50
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian.....	51
3.2.1 Tempat Penelitian.....	51
3.2.2 Waktu Penelitian.....	51
3.3 Populasi dan Sampel Penelitian.....	51
3.4 Teknik Pengumpulan Data.....	52
3.5 Instrumen Penelitian.....	54
3.6 Teknik Pengolahan Data.....	57
3.7 Teknik Analisis Data.....	57
3.7.1 Mechanical Alloying (MA).....	57
3.7.2 Spark Plasma Sintering (SPS).....	59
3.7.3 Archimedes Density.....	61
3.7.4 Vicker Hardness.....	63
3.7.5 Karakterisasi.....	64
3.7.5.1 XRD.....	64
3.7.5.2 SEM-EDS.....	65
3.7.6 Oksidasi Temperatur Tinggi menggunakan <i>Muffle Furnance</i>	67
3.7.7 FESEM-EDS.....	68
BAB 4	70
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	70
4.1 Deskripsi Data.....	70

4.1.1 Data Preparasi Serbuk	70
4.1.2 Data Sintesa Sampel	70
4.1.3 Data Karakterisasi Awal	70
4.1.4 Data Pengujian.....	71
4.2 Hasil Pengumpulan Data	72
4.2.1 Data Preparasi Serbuk	72
4.2.2 Data Sintesa Sampel	73
4.2.4 Data Pengujian.....	76
4.3 Hasil Pengolahan Data.....	80
4.3.1 Data Preparasi Serbuk.....	80
4.3.2 Data Sintesa Sampel	81
4.3.4 Data Pengujian.....	85
4.4 Pembahasan	91
4.4.1 Sebelum Oksidasi	91
4.4.2. Setelah Oksidasi	93
KESIMPULAN DAN SARAN	103
5.1 Kesimpulan	103
5.2 Saran.....	104
DAFTAR PUSTAKA.....	105

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Diagram dari mesin jet turbin gas	12
Gambar 2. 2 The 3-stage Turbine dari GE J79.....	13
Gambar 2. 3 Distribusi Material pada Mesin Turbin Pesawat : General Electric (CF6) used in the Boeing 787	15
Gambar 2. 4 Sel Satuan MoSi ₂ (kiri) dan Susunan Lapisan Pseudo-Heksagonal (kanan)..	18
Gambar 2. 5 Mekanisme Terjadinya Tumbukan.....	20
Gambar 2. 6 Prinsip Kerja Spark Plasma Sintering (SPS).....	23
Gambar 2. 7 Mekanisme Proses SPS.....	24
Gambar 2. 8 Alat Uji Vickers dan Tipe Lekukan Piramid Intan.....	27
Gambar 2. 9 Prinsip Kerja SEM	30
Gambar 3. 1 Shaker Mill tipe Ultime Gravity	58
Gambar 3. 2 Dr. Sinter model SPS-625, Fuji Electronic Industrial Co. Ltd.	60
Gambar 3. 3 Alat Kompaksi Manual	60
Gambar 3. 4 Proses Pengukuran Archimedes Density.....	61
Gambar 3. 5 X-Ray Diffraction RIGAKU-SmartLab	65
Gambar 3. 6 SEM (Scanning Electron Microscope).....	66
Gambar 3.8 Oksidasi Temperatur Tinggi	67
Gambar 3. 7 FESEM-EDS (Field Emission Scanning Electron Micsroscope)	68
Gambar 4.1 Data Mikrostruktur dengan SEM-EDS.....	75
Gambar 4.2 Data Uji Oksidasi Temperatur Tinggi.....	78
Gambar 4.3 Data FESEM-EDS Mapping Setelah Uji Oksidasi.....	80
Gambar 4.4 Perangkat Lunak Pengolah Data Veuz	81
Gambar 4.5 Mikrostruktur Komposisi Paduan dan Lokasi Analisis Poin EDS	84
Gambar 4.6 Visual Mikrostruktur Tiap Komposisi Hasil EDS Tiap Komposisi Setelah Uji Oksidasi Pada Temperatur 1100 ^o C selama 8 Siklus	90
Gambar 4.7 Analisa Point EDS Tiap Komposisi Setelah Uji Oksidasi Pada Temperatur 1100 ^o C selama 8 Siklus.....	90
Gambar 4.8 Perbandingan Unsur Pembentuk Lapisan Oksida	95
Gambar 4.9 Pengukuran Ketebalan Oksida Setelah Uji Oksidasi Pada Temperatur 1100 ^o C selama 8 Siklus	97

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penggolongan Advance Material	Error! Bookmark not defined.
Tabel 2.2 Perkembangan Penemuan Teknologi Spark Plasma Sintering dan Teknologi Sintering Canggih Lainnya	21
Tabel 2.3 Kajian Penelitian Terdahulu	39
Tabel 3.1. Jadwal Pelaksanaan Penelitian.....	51
Tabel 3.2 Pengumpulan Data penelitian.....	53
Tabel 3.3 Tabel Komposisi MoSi ₂ dan Al	59
Tabel 4.1 Pengumpulan Data Preparasi Serbuk.....	72
Tabel 4.2 Pengumpulan Data Sintesa Sampel.....	73
Tabel 4.3 Data Uji Densitas	76
Tabel 4.4 Data Uji Kekerasan	77
Tabel 4.5 Pengolahan Data Preparasi Serbuk	81
Tabel 4.5 Prediksi Fase Tiap Komposisi Hasil SEM – EDS.....	85
Tabel 4.6 Hasil Nilai Densitas Terukur.....	86
Tabel 4.7 Hasil Uji Kekerasan <i>Vicker Hardness</i>	87
Tabel 4.8 Pengukuran ketebalan Oksida Setelah Uji Oksidasi Pada Temperatur 1100 ^o C selama 8 Siklus	98
Tabel 4.9 Rangkuman Pembahasan Penelitian.....	99

DAFTAR GRAFIK

Grafik 4.1 Data XRD Hasil Sintesa Sampel.....	74
Grafik 4.2 XRD Setelah Uji Oksidasi Temperatur Tinggi.....	79
Grafik 4.3 Kurva Sintering dan Stoke Setiap Komposisi Paduan Material	82
Grafik 4.4 Hasil Pengolahan Data XRD	83
Grafik 4.5 Grafik Densitas Terukur.....	86
Grafik 4.6 Grafik Kinetik Oksidasi.....	88
Grafik 4.7 Hasil Pengolahan XRD Oksidasi	89