



UNIVERSITAS PERTAHANAN RI

**EFEK SILIKON TERHADAP EVOLUSI MIKROSTRUKTUR
PADUAN FeCrAl *OXIDE DISPERSION STRENGTHENED*
DALAM MENINGKATKAN PERFORMA *CLADDING* PADA
*LIGHT WATER REACTOR***

SAFIYA DJULIANA

320210304021

**Skripsi yang Ditulis Untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan dalam
Mendapatkan Gelar Sarjana**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM MILITER
PROGRAM STUDI FISIKA
BOGOR, 2025**

LEMBAR PERSETUJUAN SKRIPSI

Nama : Safiya Djuliana
NIM : 320210304021
Program Studi : Fisika
Fakultas : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan
Alam Militer
Judul Skripsi : Efek Silikon Terhadap Evolusi Mikrostruktur
Paduan FeCrAl Oxide Dispersion
Strengthened Dalam Meningkatkan Performa
Cladding Pada Light Water Reactor

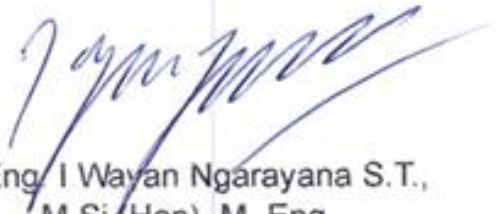
Pembimbing I,



Dr. Mutia Meireni, S.ST., M.Sc., M.Si.
NIP. 198905242022032003

Tanggal: 10 Juli 2025

Pembimbing II,



Dr. Eng. I Wayan Ngarayana S.T.,
M.Si (Han), M. Eng

NIP. 198408252008011006

Tanggal: 16 Juli 2025

Mengetahui,

Kepala Program Studi Fisika



M. Zuhair P. S.Si., M.Eng.
Kolonel Tek/NRP. 522657
Tanggal: 6 Agustus 2025

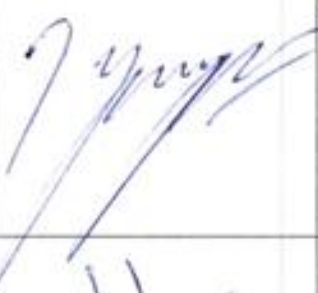
Dekan Fakultas MIPA Militer



Dr. Ir. Ence Darmo Jaya Supena, M.Si
Pembina Utama Muda IV/C
Tanggal: 11 Agustus 2025

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

Nama : Safiya Djuliana
 NIM : 320210304021
 Program Studi : Fisika
 Fakultas : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer
 Judul Skripsi : Efek Silikon Terhadap Evolusi Mikrostruktur Paduan FeCrAl Oxide Dispersion Strengthened Dalam Meningkatkan Performa Cladding Pada Light Water Reactor

No	Nama	Tanda Tangan	Tanggal
1	Dosen Pembimbing I : Dr. Mutia Meireni, S.ST.,M.Sc.,M.Si NIP. 198905242022032003		10/7-2025
2	Dosen Pembimbing II : Dr. Eng. I Wayan Ngarayana, S.T., M.Si (Han), M. Eng NIP.198408252008011006		16/7/2025
3	Dosen Penguji I : Khazali Fahmi, S.Pd.,M.Si NIP.199208142022031002		14/7/2025
4	Dosen Penguji II : Kol.Tek. Anang Setiawan, S.T., M.T NRP. 518825		10/7/2025

PERNYATAAN ORISINALITAS

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

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

Bogor, 19/6/2025



Safiya Djuliana

**LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA
ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai civitas akademika Universitas Pertahanan Republik Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Safiya Djuliana

NIM : 320210304021

Program Studi : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer

Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Pertahanan Republik Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalti-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**Efek Silikon Terhadap Evolusi Mikrostruktur Paduan FeCrAl
Oxide Dispersion Strengthened Dalam Meningkatkan Performa
Cladding Pada *Light Water Reactor***

Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Pertahanan Republik Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya

Dibuat di : Bogor
Pada tanggal : 4 Agustus 2025
Yang menyatakan



Safiya Djuliana
NIM. 320210304021

KATA PENGANTAR

Puji syukur peneliti panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa karena berkat rahmat dan karunia-Nya penulisan skripsi dengan judul: “Efek *Silikon* Terhadap Evolusi Mikrostruktur Paduan *FeCrAl Oxide Dispersion Strengthened* Dalam Meningkatkan Performa *Cladding* Pada *Light Water Reactor*” dapat diselesaikan.

Penyusunan skripsi ini ditujukan sebagai salah satu syarat dalam memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Pertahanan RI. Penyusunan skripsi ini dapat diselesaikan berkat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Untuk itu, pada kesempatan ini Kadet Mahasiswa mengucapkan terima kasih kepada:

1. Letnan Jenderal TNI (Purn) Jonni Mahroza S.IP., M.A., M.Sc., CIQnR., CIQaR., Ph.D. selaku Rektor Universitas Pertahanan RI.
2. Dr. Ir. Ence Darmo Jaya Supena M.Si., selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Pertahanan;
3. M. Zuhnir Piliang, S.Si., M.Eng., selaku Kepala Program Studi Fisika Militer Universitas Pertahanan;
4. Dr. Mutia Meireni, S.S.T., M.Sc., M.Si dan Dr. Eng. I Wayan Ngarayana, S.T., M.Si (Han), M. Eng selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan dan bantuan selama pembuatan skripsi.
5. Mama dan Papa yang doanya menembus langit. Serta, kak Nia, bang Iqbal dan Baim yang selalu mendukung secara moril.
6. Rekan-rekan seperjuangan yang sudah bersama sama selama 4 tahun ini.
7. Pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu dan telah banyak membantu dalam menyelesaikan skripsi ini.

Semoga Tuhan Yang Maha Esa membalas kebaikan berbagai pihak atas bantuannya.

Saya menyadari bahwa skripsi ini masih kurang sempurna, oleh karena itu dengan kerendahan hati mengharapkan kritik dan saran yang konstruktif demi kesempurnaan skripsi ini.

Bogor, 2025

Safiya Djuliana



ABSTRAK

EFEK SILIKON TERHADAP EVOLUSI MIKROSTRUKTUR PADUAN FeCrAl *OXIDE DISPERSION STRENGTHENED* DALAM MENINGKATKAN PERFORMA *CLADDING* PADA *LIGHT WATER* *REACTOR*

Kecelakaan nuklir Fukushima Daiichi pada tahun 2011 menjadi pemicu utama bagi pengembangan material *Accident Tolerant Fuel* (ATF), yaitu bahan bakar nuklir dan komponennya yang dirancang untuk memiliki ketahanan lebih tinggi terhadap kondisi kecelakaan parah. Salah satu kandidat potensial untuk material kelongsong ATF adalah paduan FeCrAl *Oxide Dispersion Strengthened* (ODS) karena memiliki stabilitas termal tinggi, ketahanan terhadap oksidasi, serta kekuatan mekanik yang baik. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan silikon terhadap struktur mikro dan sifat mekanik paduan Fe-12,5Cr-4,5Al ODS yang disintesis melalui metode *powder metallurgy*, dengan variasi konsentrasi Si sebesar 0 hingga 4 wt.%. Penentuan fasa dan titik lebur dilakukan melalui analisis diagram fasa, sementara karakterisasi mikrostruktur dan sifat mekanik dilakukan menggunakan mikroskop optik, SEM-EDS, XRD, *helium pycnometer*, dan uji kekerasan Vickers. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan Si berkontribusi signifikan terhadap penyempitan ukuran butir dan penurunan ukuran kristalit, yang berdampak langsung pada peningkatan kekerasan paduan. Hubungan ini mencerminkan peningkatan ketahanan terhadap deformasi plastis seiring peningkatan kadar Si. Namun, pada variasi 0,5 wt.% Si, ditemukan anomali berupa peningkatan ukuran butir sehingga memerlukan kajian lebih lanjut untuk memahami mekanismenya.

Kata kunci: Struktur Mikro, FeCrAl, ODS, *Powder Metallurgy*, ATF

ABSTRACT

EFFECT OF SILICON ON THE MICROSTRUCTURAL EVOLUTION FeCrAl OXIDE DISPERSION STRENGTHENED ALLOYS FOR IMPROVING CLADDING PERFORMANCE IN LIGHT WATER REACTOR

The Fukushima Daiichi nuclear accident in 2011 served as a major driving force behind the development of Accident Tolerant Fuel (ATF) materials—nuclear fuel and its components designed to exhibit higher resilience under severe accident conditions. One of the promising candidates for ATF cladding material is the FeCrAl Oxide Dispersion Strengthened (ODS) alloy, owing to its high thermal stability, oxidation resistance, and good mechanical strength. This study aims to evaluate the effect of silicon (Si) addition on the microstructure and mechanical properties of Fe-12.5Cr-4.5Al ODS alloy synthesized via powder metallurgy, with Si concentration varied from 0 to 4 wt.%. Phase identification and melting point determination were carried out through phase diagram analysis, while microstructural and mechanical characterizations were conducted using optical microscopy, SEM-EDS, XRD, helium pycnometer, and Vickers hardness testing. The results showed that Si addition significantly contributed to grain refinement and crystallite size reduction, which directly improved the alloy's hardness. This relationship reflects enhanced resistance to plastic deformation with increasing Si content. However, at 0.5 wt.% Si, an anomaly was observed in the form of grain growth which necessitates further investigation to understand the underlying mechanism.

Keywords: Microstructure, FeCrAl, ODS, Powder Metallurgy, Accident Tolerant Fuel

DAFTAR ISI

SAMPUL DEPAN	i
LEMBAR PERSETUJUAN SKRIPSI.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK.....	vii
<i>ABSTRACT</i>	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.4.1 Manfaat Teoritis.....	3
1.4.2 Manfaat Praktis	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Landasan Teori.....	5
2.1.1 Reaksi dan Reaktor Nuklir	5
2.1.2 Kecelakaan Reaktor Fukushima Daiichi	9
2.1.3 <i>Fuel Cladding</i> (Kelongsong Bahan Bakar).....	12
2.1.4 <i>Accident Tolerant Fuel</i> (ATF)	13
2.1.5 FeCrAl.....	15
2.1.6 <i>Oxide Dispersion Strengthened</i> (ODS).....	18
2.1.7 <i>Calculation Phase Diagram</i> (CALPHAD)	17
2.1.8 <i>Powder Metallurgy</i>	18
2.1.9 Karakterisasi Material	19
2.2 Hasil Penelitian Terdahulu.....	26

2.3 Kerangka Berpikir.....	29
2.4 Hipotesis	30
BAB III METODE PENELITIAN.....	31
3.1 Metode Penelitian	31
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	31
3.3 Alat dan Bahan.....	33
3.4 Variabel Penelitian	34
3.5 Prosedur Penelitian.....	35
3.5.1 <i>Calphad Modelling</i>	37
3.5.2 Detail Prekursor Material	37
3.5.3 <i>Powder Metallurgy</i>	38
3.5.4 <i>Polishing</i> dan <i>Etsa</i>	40
3.5.5 Karakterisasi Material	40
3.6 Metode Analisis	41
BAB IV HASIL PENELITIAN.....	42
4.1 Hasil.....	42
4.1.1 Diagram Fasa Fe-Cr-Al.....	42
4.1.2 Pengamatan Mikroskopik	43
4.1.3 Pengujian Kekerasan.....	45
4.1.4 Pengujian X-Ray Diffraction.....	46
4.1.5 Pengujian SEM-EDS	49
4.1.6 Pengujian Densitas.....	49
4.2 Pembahasan.....	51
4.2.1 Analisis Fasa Diagram Fe-Cr-Al	51
4.2.2 Morfologi Permukaan.....	52
4.2.3 Mikrostruktur	53
4.2.4 Densitas	54
4.2.5 Kontribusi Silikon terhadap Performa Mekanik FeCrAl untuk <i>Cladding</i>	55
BAB V KESIMPULAN	57

5.1 Kesimpulan	57
5.2 Saran	58
DAFTAR PUSTAKA.....	59
LAMPIRAN	68

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Reaksi Fisi Nuklir	5
Gambar 2.2	Pelet Bahan Bakar (UO_2)	6
Gambar 2.3	Generasi dari Sistem Energi Nuklir	7
Gambar 2.4	Skema Pressurized Water Reactor	8
Gambar 2.5	Skema <i>Boiling Water Reactor</i>	8
Gambar 2.6	Tampilan Keseluruhan PLTN Fukushima Daiichi	9
Gambar 2.7	Skematik Pelelehan Teras BWR Fukushima Daiichi	10
Gambar 2.8	Skema Rekapitulatif Ledakan Reaktor	12
Gambar 2.9	<i>Cladding</i> Reaktor	13
Gambar 2.10	Efek <i>Chromium</i> dan Aluminium pada FeCrAl	15
Gambar 2.11	Diagram <i>Ternary</i> Fe-Cr-Al	16
Gambar 2.12	Prinsip Kerja <i>Light Microscope Optical</i>	20
Gambar 2.13	Spektrum Elektromagnetik.....	21
Gambar 2.14	Prinsip Kerja EDX.....	23
Gambar 2.15	Indentor Piramida Berlian untuk Uji Vickers	24
Gambar 2.16	Diagram <i>Pycnometer</i> Gas-Volume Konstan.....	25
Gambar 2.3	Kerangka Berpikir	30
Gambar 3.5	Prosedur Penelitian	36
Gambar 3.6	Proses Kompaksi	39
Gambar 3.7	Proses <i>Sintering</i>	39
Gambar 4.1	Diagram Fasa Fe-Cr-Al	43
Gambar 4.2	Permukaan Spesimen FeCrAl ODS Sebelum Etsa.....	44
Gambar 4.3	Permukaan Spesimen FeCrAl ODS Setelah Etsa.....	45
Gambar 4.4	Distribusi Penyebaran Ukuran Batas Butir FeCrAl ODS.....	46
Gambar 4.5	Grafik Hubungan Nilai <i>Vicker Hardness</i> dengan Komposisi Si.....	47
Gambar 4.6	Pola Difraksi Hasil XRD	48

Gambar 4.7	Morfologi FeCrAl ODS Menggunakan SEM/EDX	52
Gambar 4.8	Kurva Komposisi-Densitas Spesimen FeCrAl ODS	53



DAFTAR TABEL

Tabel 2.4 Referensi Penelitian Terdahulu	27
Tabel 3.1 Rencana Kegiatan Penelitian	33
Tabel 3.2 Prekursor <i>Powder Metallurgy</i>	34
Tabel 3.3 Komposisi Sampel	35
Tabel 3.4 Dimensi Sampel	35
Tabel 3.5 Sifat Fisik Besi (Fe)	37
Tabel 3.6 Sifat Fisik Kromium (Cr)	37
Tabel 3.7 Sifat Fisik Aluminium (Al)	37
Tabel 3.8 Sifat Fisik Silika (Si)	38
Tabel 3.9 Sifat Fisik Yttria(III) <i>Oxide</i>	38
Tabel 4.1 Perhitungan Porositas Menggunakan <i>Software ImageJ</i>	45
Tabel 4.2 Analisis Ukuran Kristal Spesimen FeCrAl ODS Menggunakan <i>Scherrer Equation</i>	49
Tabel 4.3 Analisis Ukuran Kristal Spesimen FeCrAl ODS0.25 Si Menggunakan <i>Scherrer Equation</i>	49
Tabel 4.4 Analisis Ukuran Kristal Spesimen FeCrAl ODS 0.5 Si Menggunakan <i>Scherrer Equation</i>	49
Tabel 4.5 Analisis Ukuran Kristal Spesimen FeCrAl ODS 1 Si Menggunakan <i>Scherrer Equation</i>	50
Tabel 4.6 Analisis Ukuran Kristal Spesimen FeCrAl ODS 2 Si Menggunakan <i>Scherrer Equation</i>	50
Tabel 4.7 Analisis Ukuran Kristal Spesimen FeCrAl ODS 4 Si Menggunakan <i>Scherrer Equation</i>	50
Tabel 4.8 Analisis Data XRD Berdasarkan <i>Database ICSD Reference</i> <i>Code: 98-005-7655</i>	50
Tabel 4.9 Persentase Kandungan Unsur	