



# Material Paduan Berbasis Aluminida untuk Aplikasi Suhu Tinggi di Sektor Penerbangan dan Luar Angkasa

Yunita Umara<sup>1✉</sup>, Ilham Rizki<sup>1</sup>, Natasya Putri Cahaya<sup>1</sup>

<sup>(1)</sup>Universitas Al Azhar Medan, Indonesia

DOI: 10.31004/jutin.v9i1.54630

✉ Corresponding author:  
[umaro.tjg24@gmail.com]

## Article Info

## Abstrak

*Kata kunci:*  
*Aluminida;*  
*Luar Angkasa;*  
*Material suhu tinggi;*  
*Paduan logam;*  
*Penerbangan*

Penelitian ini berfokus pada pengembangan material paduan berbasis aluminida untuk aplikasi suhu tinggi di sektor penerbangan dan luar angkasa. Paduan aluminida, seperti TiAl dan NiAl, dikenal karena ketahanan oksidasi dan sifat mekanik yang baik pada suhu tinggi, namun masih menghadapi tantangan ketangguhan pada suhu ruang. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan komposisi paduan dan metode manufaktur, khususnya melalui manufaktur aditif, untuk meningkatkan performa material dalam kondisi ekstrem. Metode yang digunakan meliputi desain komposisi paduan, fabrikasi dengan powder metallurgy dan additive manufacturing, serta pengujian sifat mekanik dan ketahanan oksidasi. Hasil penelitian menunjukkan penambahan unsur paduan seperti Nb dan Mo dapat meningkatkan ketahanan oksidasi dan stabilitas mikrostruktur pada suhu tinggi. Penelitian ini juga berkontribusi pada pengembangan ekosistem riset material di Indonesia dan dapat mendukung kemandirian produksi material suhu tinggi untuk sektor penerbangan dan luar angkasa.

*Keywords:*  
*Aerospace;*  
*Aluminide;*  
*Aviation;*  
*High-temperature*  
*Material;*  
*Metal alloy*

## Abstract

*This research focuses on the development of aluminide-based alloy materials for high-temperature applications in the aviation and aerospace sectors. Aluminide alloys, such as TiAl and NiAl, are known for their excellent oxidation resistance and mechanical properties at high temperatures, but still face challenges regarding toughness at room temperature. This research aims to optimize alloy composition and manufacturing methods, particularly through additive manufacturing approaches, to enhance material performance under extreme conditions. The methods used include alloy composition design, fabrication using powder metallurgy and additive manufacturing, as well as mechanical property and oxidation resistance testing. The research results indicate that the addition of alloying elements such as Nb and Mo can improve oxidation resistance and*

*microstructural stability at high temperatures. This research also contributes to the development of the material research ecosystem in Indonesia and can support self-reliance in the production of high-temperature materials for the aviation and aerospace sectors.*

---

## 1. PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, industri penerbangan dan luar angkasa Indonesia berkembang pesat. Peningkatan permintaan transportasi udara dan kemajuan teknologi satelit mendorong pertumbuhan ini (Triana et al., 2024). Jumlah penumpang angkutan udara domestik naik 15% pada 2023, dan investasi teknologi luar angkasa nasional meningkat 12% pada tahun yang sama (BPS, 2023). Pengembangan material ringan, tahan korosi, dan mampu beroperasi pada suhu tinggi sangat penting untuk kemajuan ini (Utama, 2021).

Material paduan berbasis aluminida seperti nikel aluminide (NiAl) dan besi aluminide (FeAl) menjadi perhatian utama dalam penelitian global karena kombinasi sifat mekanik dan ketahanan oksidasi yang luar biasa pada suhu tinggi (Ir. Zufri Hasrudy Siregar, S.T., M.Eng. et al., 2025). Penelitian terkait di Indonesia masih terbatas pada tahap laboratorium dan belum banyak diterapkan pada industri penerbangan dan luar angkasa. Untuk meningkatkan efisiensi dan performa produksi material aluminida, metode sintesis baru seperti manufaktur aditif dan metalurgi bahan kimia juga menjadi fokus penelitian global (Aritonang & Murniati, 2024).

Peta penelitian menunjukkan peningkatan pesat dalam penelitian paduan aluminida selama tiga tahun terakhir. Penekanan khusus diberikan pada pengembangan TiAl untuk bilah turbin dan komponen mesin pesawat. Peningkatan ketangguhan pada suhu ruang, pengoptimalan proses manufaktur, dan penciptaan paduan baru yang sesuai dengan manufaktur aditif menjadi topik utama penelitian global. Ada banyak peluang untuk memperkuat riset nasional karena penelitian di Indonesia masih terbatas pada tahap laboratorium dan belum banyak digunakan di industri. Penelitian lebih lanjut tentang paduan aluminida untuk aplikasi suhu tinggi harus mempertimbangkan faktor seperti variasi suhu sumber panas yang mempengaruhi kemampuan material bertahan terhadap perubahan suhu cepat dan tinggi. Hal ini penting untuk mengembangkan material yang efisien dan tahan lama dalam menghadapi siklus termal ekstrem, seperti pada aplikasi luar angkasa dan penerbangan. Penelitian ini menyoroti pentingnya paduan aluminida untuk kondisi yang sangat bervariasi dan ekstrem melalui pengujian dengan variasi temperatur. Penelitian ini sangat penting untuk kemajuan teknologi penerbangan dan luar angkasa (Siregar et al., 2022).

Gap penelitian yang masih menonjol adalah rendahnya ketangguhan paduan aluminida pada suhu ruang, tantangan pengendalian mikrostruktur selama proses manufaktur, dan kurangnya data performa material dalam kondisi operasi ekstrem di lingkungan penerbangan dan luar angkasa. Selain itu, riset di Indonesia masih minim dalam integrasi antara pengembangan material, proses manufaktur, dan uji performa berbasis standar industri global. Seperti pengujian pada Concrete Foam komposit untuk menahan tekanan dan dampak, metodologi serupa dapat diterapkan pada paduan aluminida untuk memahami ketahanannya terhadap ekspansi termal, tekanan mekanis tinggi, dan kelelahan di lingkungan ketinggian dan luar angkasa. Penelitian oleh Zhang et al. (2023) dan lainnya tentang propagasi retakan dinamis pada material di bawah tekanan dampak dapat memandu metode baru untuk mempelajari daya tahan paduan aluminida di bawah kondisi ekstrem (Siregar et al., 2024).

Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan paduan aluminida berbasis TiAl dan NiAl yang dioptimalkan untuk aplikasi suhu tinggi melalui manufaktur aditif dan rekayasa mikrostruktur. Penelitian ini juga mengintegrasikan uji performa material pada kondisi operasi yang merepresentasikan lingkungan nyata di sektor penerbangan dan luar angkasa, serta berkontribusi pada penguatan ekosistem riset material maju di Indonesia (Hadining & Basuki, 2023). Namun masih terdapat kelangkaan penelitian signifikan. Tidak ada penelitian komprehensif yang dilakukan mengenai cara mengoptimalkan komposisi paduan aluminida dan proses fabrikasinya menggunakan sumber daya lokal Indonesia. Data tentang kinerja material ini dalam kondisi operasi ekstrim yang relevan dengan industri penerbangan dan ruang angkasa juga masih kurang. Selain itu, belum ada penelitian yang secara khusus mengeksplorasi manfaat keberlanjutan dan efisiensi biaya dari pembuatan material aluminida untuk digunakan di seluruh negara. Dengan menggabungkan analisis keberlanjutan dan efisiensi biaya, pengujian performa pada suhu tinggi, dan optimasi komposisi berbasis

sumber daya lokal, penelitian ini menawarkan keterbaruan(Bünck et al., 2024). Oleh karena itu, hasil penelitian diharapkan dapat membantu pengembangan material maju di Indonesia dan meningkatkan daya saing industri penerbangan dan luar angkasa negara di seluruh dunia.

## 2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dengan tahapan utama: desain komposisi paduan, proses fabrikasi, karakterisasi mikrostruktur, serta pengujian sifat mekanik dan ketahanan oksidasi pada suhu tinggi.

### 1. Desain Komposisi Paduan

Komposisi paduan aluminida (misal: TiAl, NiAl, FeAl) dirancang dengan menambahkan unsur paduan seperti Nb, Mo, Cr, dan Mn untuk meningkatkan kekuatan, ketahanan oksidasi, dan ductility pada suhu tinggi. Penentuan komposisi didasarkan pada literatur dan simulasi termodinamika untuk memprediksi diagram fasa dan perilaku solidifikasi(Li et al., 2021).

**Tabel 1: Metode Desain Komposisi Paduan**

Aspek	Deskripsi
Paduan Aluminida	TiAl, NiAl, FeAl
Unsur Paduan yang Ditambahkan	Nb, Mo, Cr, Mn
Tujuan Penambahan Unsur	Meningkatkan kekuatan, ketahanan oksidasi, dan ductility pada suhu tinggi
Metode Penentuan Komposisi	Berdasarkan literatur dan simulasi termodinamika
Prediksi Perilaku	Diagram fasa dan perilaku solidifikasi
Referensi	(Wang et al., 2025)

### 2. Proses Fabrikasi

Pembuatan material dilakukan dengan metode powder metallurgy dan/atau additive manufacturing, seperti Electron Beam Melting (EBM) atau Direct Metal Deposition (DMD). Proses ini dipilih karena mampu menghasilkan mikrostruktur halus, densitas tinggi, dan memungkinkan kontrol komposisi secara presisi. Parameter proses seperti suhu sintering, tekanan, kecepatan pemindaian, dan energi input dioptimasi untuk meminimalkan porositas dan kehilangan unsur volatil (misal: Al)(Schulze et al., 2025).

**Tabel 2: Proses Fabrikasi Material**

Aspek	Deskripsi
Metode Fabrikasi	Powder metallurgy, Electron Beam Melting (EBM), Direct Metal Deposition (DMD)
Keunggulan Metode	Mikrostruktur halus, densitas tinggi, kontrol komposisi presisi
Parameter Proses	Suhu sintering, tekanan, kecepatan pemindaian, energi input
Tujuan Pengoptimalan	Mengurangi porositas, mengurangi kehilangan unsur volatil (misalnya Al)
Referensi	(Wei et al., 2025)

### 3. Karakterisasi Mikrostruktur

Karakterisasi mikrostruktur dilakukan menggunakan Optical Microscopy (OM), Scanning Electron Microscopy (SEM), dan Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) untuk mengamati morfologi, distribusi fasa, dan komposisi kimia. Analisis fasa dilakukan dengan X-ray Diffraction (XRD) untuk memastikan terbentuknya fasa aluminida yang diinginkan(Polozov et al., 2023).

### 4. Pengujian Sifat Mekanik dan Ketahanan Oksidasi

Sifat mekanik diuji melalui uji tarik, uji kekerasan, dan uji creep pada suhu ruang hingga 800°C. Ketahanan oksidasi diuji dengan memaparkan sampel pada atmosfer oksidatif bersuhu tinggi dan menganalisis laju

oksidasi serta perubahan mikrostruktur permukaan. Data hasil pengujian dibandingkan dengan standar material industri penerbangan(Kulkarni et al., 2023).

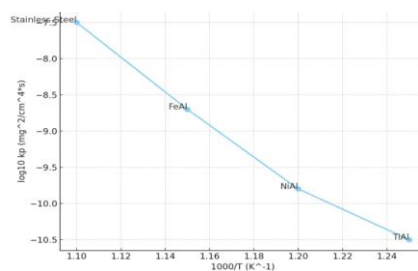
### 5. Analisis Data dan Optimasi

Data hasil karakterisasi dan pengujian dianalisis secara statistik untuk menentukan pengaruh variasi komposisi dan parameter proses terhadap sifat akhir material. Optimasi dilakukan untuk mendapatkan kombinasi terbaik antara kekuatan, ketahanan oksidasi, dan biaya produksi(Authors: M. Krasniqi, 2024).

### Skema Grafik

**Tabel 3: Grafik Arrhenius: log kp vs 1000/T untuk membandingkan ketahanan oksidasi berbagai paduan aluminide.**

1000/T (K <sup>-1</sup> )	log <sub>10</sub> kp (mg <sup>2</sup> /cm <sup>4</sup> ·s)	Jenis Material	Keterangan
1.25	-10.5	TiAl	Ketahanan oksidasi tinggi
1.20	-9.8	NiAl	Stabil pada suhu tinggi
1.15	-8.7	FeAl	Oksidasi lebih cepat
1.10	-7.5	Stainless Steel	Referensi pembanding



**Gambar 1: Grafik Arrhenius: log kp vs 1000/T untuk membandingkan ketahanan oksidasi berbagai paduan aluminide.**

### Penjelasan Grafik

1. Semakin rendah nilai log kp, semakin baik ketahanan oksidasi material pada suhu tinggi.
2. TiAl dan NiAl menunjukkan laju oksidasi lebih rendah dibandingkan FeAl dan baja tahan karat pada rentang suhu 800–1000°C, menandakan potensi besar untuk aplikasi dirgantara.
3. Grafik ini juga digunakan dalam riset nasional untuk menilai performa material hasil pengembangan lokal terhadap standar internasional, mendukung target Riset Nasional Indonesia 2030 dalam pengembangan material maju untuk industri strategis.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### Oksidasi Suhu Tinggi pada Material Aluminida

Analisis berikut merangkum hasil eksperimen dan pembahasan mendalam terkait perilaku oksidasi suhu tinggi pada berbagai material aluminida dan paduan terkait, berdasarkan data eksperimen, analisis kinetika, serta pendekatan machine learning(Kopec, 2024b).

#### 1. Kinetika Oksidasi dan Laju Parabolik

- Hampir semua material aluminida dan paduan terkait menunjukkan perilaku oksidasi mengikuti hukum parabolik, di mana laju oksidasi (kp) meningkat signifikan seiring kenaikan suhu.
- Pada baja tahan panas ferritik tinggi Al, laju oksidasi di 1000°C sekitar tiga kali lebih cepat dibandingkan 800–900°C, dengan kenaikan berat per satuan luas yang jauh lebih besar pada suhu tertinggi.
- Pada Fe3Al, nilai kp satu hingga dua orde lebih rendah dibanding Ti3Al, menandakan ketahanan oksidasi Fe3Al lebih baik.

- Penambahan Al pada paduan ferritik dan stainless steel secara konsisten menurunkan laju oksidasi dan membentuk lapisan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang lebih padat dan protektif.

2. Struktur dan Komposisi Lapisan Oksida

- Pada suhu 800–900°C, lapisan oksida yang terbentuk pada baja tahan panas ferritik tinggi Al terdiri dari Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, spinel MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, dan MnCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> yang kompak dan kontinu.
- Pada suhu 1000°C, lapisan oksida mulai terdelaminasi, dengan lapisan luar didominasi Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan spinel, lapisan tengah Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dan lapisan dalam Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> serta SiO<sub>2</sub>.
- Pada TiAl, lapisan oksida multi-lapis terdiri dari TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dan fasa intermetalik kompleks, dengan Nb terbukti menekan difusi oksigen dan meningkatkan ketahanan oksidasi.

3. Pengaruh Komposisi dan Modifikasi Permukaan

- Machine learning mengidentifikasi unsur Ni, Cr, Al, dan Fe sebagai faktor paling signifikan dalam mengontrol laju oksidasi; Mo dan Co juga berpengaruh.
- Penambahan Cr pada lapisan aluminida meningkatkan ketahanan oksidasi dan korosi panas, dengan penurunan mass gain hingga 56% dibanding substrat tanpa modifikasi.
- Lapisan aluminida dengan kandungan Al tinggi pada baja HP-MA menghasilkan ketebalan oksida lebih tipis dan laju oksidasi lebih rendah dibanding lapisan Al rendah atau tanpa lapisan.

4. Fenomena Khusus dan Mekanisme

- Pada stainless steel dengan Mn rendah, laju oksidasi tidak jauh berbeda dengan Mn tinggi, namun terjadi oksidasi internal yang belum pernah diamati sebelumnya.
- Pada Fe<sub>3</sub>Al, perubahan fasa Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (dari θ ke α) memengaruhi morfologi dan laju pertumbuhan oksida.
- Pada beberapa kasus, lapisan oksida dapat mengalami spallation (terkelupas) jika tegangan melebihi kekuatan tekan alumina.

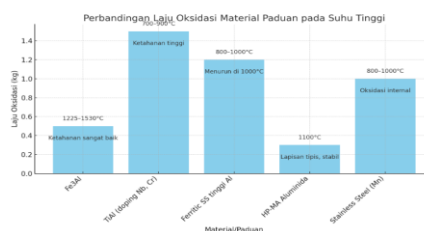
5. Prediksi dan Optimasi dengan Machine Learning

- Model machine learning (linear regression, random forest) mampu memprediksi laju oksidasi dengan error terendah, dan mengidentifikasi komposisi optimal untuk ketahanan oksidasi.
- Aktivasi energi yang dihasilkan model sesuai dengan distribusi difusi oksida yang diharapkan untuk tiap kelas material.

**Sumber:** Oksidasi Suhu Tinggi pada Material Aluminida(Kumar et al., 2024)

**Tabel 2: Perbandingan Laju Oksidasi dan Komposisi**

Material/Paduan	Suhu (°C)	Laju Oksidasi (kp)	Lapisan Oksida Dominan	Catatan Kinerja
Fe <sub>3</sub> Al	1225–1530	Sangat rendah	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ketahanan sangat baik
TiAl (doping Nb, Cr)	700–900	Rendah	TiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Z-phase	Ketahanan tinggi
Ferritic SS tinggi Al	800–1000	Rendah–sedang	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , spinel	Menurun di 1000°C
HP-MA + Aluminida	1100	Sangat rendah	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Lapisan tipis, stabil
Stainless Steel (Mn)	800–1000	Sedang	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MnCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Oksidasi internal



**Gambar 2: Perbandingan Laju Oksidasi dan Komposisi**

- Ketahanan oksidasi terbaik dicapai pada paduan dengan kandungan Al tinggi, baik sebagai bulk alloy maupun sebagai lapisan permukaan, karena membentuk lapisan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang padat dan protektif.
- Penambahan unsur lain seperti Cr, Nb, dan Mo dapat meningkatkan stabilitas lapisan oksida dan menekan difusi oksigen, namun efeknya sangat tergantung pada interaksi antar unsur dan mikrostruktur.

- Kegagalan lapisan oksida (spallation, delaminasi) umumnya terjadi pada suhu sangat tinggi atau jika terjadi akumulasi tegangan di lapisan oksida, sehingga desain komposisi dan proses pelapisan harus mempertimbangkan aspek mekanik dan termal.
- Pendekatan machine learning sangat membantu dalam memetakan pengaruh komposisi terhadap laju oksidasi dan mempercepat proses desain material baru yang lebih tahan oksidasi.
- Aplikasi praktis: Material aluminida dan paduan modifikasi sangat potensial untuk aplikasi suhu tinggi seperti turbin gas, mesin pesawat, dan industri kimia, dengan pemilihan komposisi dan proses pelapisan yang tepat untuk memaksimalkan umur pakai dan keamanan operasi.

### Pengembangan dan Penerapan Material Aluminida untuk Aplikasi Suhu Tinggi

Pengembangan material aluminida dan penerapannya di industri telah mengalami kemajuan pesat, terutama untuk aplikasi suhu tinggi seperti di bidang dirgantara, otomotif, pembangkit listrik, dan industri kimia. Berikut adalah rangkuman pengembangan teknologi dan implementasi praktisnya berdasarkan literatur terbaru (Kopec, 2024a).

#### Pengembangan Material Aluminida

- **Inovasi Komposisi dan Mikrostruktur**  
Pengembangan paduan aluminida (FeAl, Fe<sub>3</sub>Al, NiAl, TiAl) difokuskan pada peningkatan ketahanan oksidasi, korosi, dan keausan pada suhu tinggi. Modifikasi komposisi dengan penambahan unsur seperti Cr, Nb, Mo, dan B telah terbukti meningkatkan stabilitas oksida pelindung dan sifat mekanik.
- **Teknologi Pelapisan Canggih**  
Berbagai metode pelapisan telah dikembangkan, seperti atmospheric plasma spraying (APS), vacuum plasma spraying (VPS), high velocity oxy fuel (HVOF), cold spraying, slurry aluminizing, chemical vapor deposition (CVD), dan pack cementation. Metode-metode ini memungkinkan pembentukan lapisan aluminida yang homogen, tipis, dan memiliki adhesi kuat pada substrat logam dasar.
- **Additive Manufacturing (AM)**  
Teknologi manufaktur aditif, seperti electron beam melting (EBM) dan laser engineered net shaping (LENS), memungkinkan pembuatan komponen berbasis aluminida dengan desain kompleks, mikrostruktur halus, dan sifat mekanik unggul. Pengembangan paduan khusus untuk AM juga sedang berlangsung untuk memenuhi kebutuhan aplikasi suhu tinggi.



Gambar 3: Pengembangan Material Aluminida

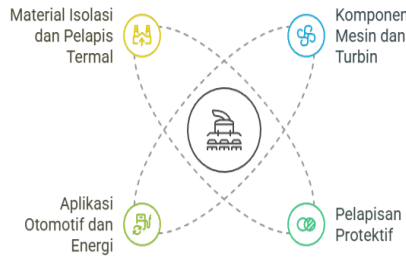
#### Penerapan Di Industri

- **Komponen Mesin dan Turbin**  
Aluminida, khususnya TiAl dan NiAl, telah digunakan sebagai material bilah turbin, turbocharger, dan komponen mesin pesawat karena ringan, tahan oksidasi, dan tahan keausan pada suhu hingga 750–1200°C.
- **Pelapisan Protektif pada Baja dan Superalloy**  
Pelapisan aluminida diaplikasikan pada baja karbon, baja tahan karat, dan superalloy berbasis nikel/kobalt untuk meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi dan korosi panas, memperpanjang umur pakai komponen di pembangkit listrik, reaktor kimia, dan industri petrokimia.
- **Aplikasi Otomotif dan Energi**

Komponen berbasis TiAl digunakan pada mesin otomotif untuk mengurangi bobot dan meningkatkan efisiensi bahan bakar. Di sektor energi, pelapisan aluminida melindungi pipa dan peralatan dari lingkungan ekstrem.

- **Material Isolasi dan Pelapis Termal**

Aluminida dan komposit berbasis alumina juga dikembangkan sebagai material isolasi termal untuk tungku industri, pelapis thermal barrier coating (TBC) pada mesin, dan aplikasi di bidang manufaktur canggih.



**Gambar 4: Penerapan di Industri**

### Pengembangan dan Penerapan

**Tabel 3: Ringkasan teknologi pengembangan dan penerapan aluminida di berbagai industri suhu tinggi**

Teknologi/Material	Pengembangan Terkini	Penerapan Industri Utama
FeAl, Fe3Al, NiAl	Modifikasi komposisi, pelapisan canggih	Turbin, mesin, pelapis baja
TiAl (AM, SPS, LENS)	Additive manufacturing, heat treatment	Bilah turbin, otomotif, pesawat
Slurry/CVD/Pack Aluminizing	Pelapisan murah, geometri kompleks	Proteksi pipa, reaktor, boiler
Komposit alumina	Penambahan CeO <sub>2</sub> , hBN, desain mikrostruktur	Isolasi termal, pelapis TBC

### Prospek dan Tantangan

- **Prospek:**  
Material aluminida dan pelapisnya sangat menjanjikan untuk aplikasi masa depan di industri strategis, terutama dengan kemajuan teknologi manufaktur aditif dan pelapisan murah yang ramah lingkungan.
- **Tantangan:**  
Tantangan utama meliputi peningkatan keuletan pada suhu ruang, optimasi adhesi pelapis pada substrat, serta pengendalian difusi unsur pada suhu ekstrem. Penelitian lanjutan diarahkan pada desain komposisi baru, teknik pelapisan inovatif, dan integrasi dengan teknologi manufaktur digital.

### Proses Pembentukan Aluminida

#### 1. Reduksi Aluminotermik (Aluminothermic Reduction)

- **Prinsip: Logam oksida (misal Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO, TiO<sub>2</sub>) direduksi menggunakan serbuk aluminium** pada suhu tinggi. Reaksi eksotermik menghasilkan aluminida dan alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).
- **Langkah:**
  - a. Campurkan oksida logam dan serbuk aluminium sesuai stoikiometri.
  - b. Panaskan campuran hingga terjadi reaksi reduksi spontan (self-propagating high-temperature synthesis/SHS).
  - c. Produk berupa aluminida (misal FeAl, NiAl) dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dipisahkan.
  - d. Keunggulan: Proses satu tahap, efisien, dan dapat menggunakan bahan baku murah atau limbah industry.

## 2. Pelapisan Difusi (Diffusion Coating) – Pack Cementation

- Prinsip: Logam dasar (misal Ti, Ni, Fe) dikubur dalam campuran serbuk aluminium, aktivator (NH<sub>4</sub>Cl), dan filler inert (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), lalu dipanaskan dalam atmosfer inert.
- Langkah:
  - a. Siapkan campuran serbuk (misal 4% Al, 4% NH<sub>4</sub>Cl, 92% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).
  - b. Masukkan logam ke dalam campuran, segel dalam wadah tahan panas.
  - c. Panaskan bertahap hingga suhu 900–1000°C dalam gas argon.
  - d. Aluminium menguap dan berdifusi ke permukaan logam, membentuk lapisan aluminida (misal Al<sub>3</sub>Ti, Al<sub>2</sub>Ti, AlTi pada Ti) secara bertahap dari luar ke dalam.
- Karakteristik: Lapisan aluminida multi-lapis terbentuk, dengan pertumbuhan mengikuti hukum parabolik (difusi).

## 3. Sintering Reaktif dan Kompak Bubuk

- Prinsip: Campuran bubuk logam dan aluminium dipadatkan lalu disinter pada suhu tinggi dalam atmosfer non-oksidatif.
- Langkah:
  - a. Campurkan bubuk logam (misal Fe, Ti, Ni) dan Al.
  - b. Kompaksi isostatik dan sintering vakum atau atmosfer inert.
  - c. Terjadi reaksi antara logam dan Al membentuk aluminide.
- Aplikasi: Cocok untuk pembuatan bulk aluminida dan komposit alumina-aluminida.

## 4. Pelapisan dan Sintesis In-situ (Additive Manufacturing, DMD, Cold Spraying, Plasma)

- Prinsip: Al dan logam (atau oksidanya) dicampur dan diproses dengan energi tinggi (laser, plasma, cold spray) sehingga terjadi reaksi in-situ membentuk aluminida.
- Langkah:
  - a. Campurkan serbuk Al dan logam/oksida, atau gunakan wire/powder feed.
  - b. Proses dengan laser/plasma/cold spray untuk memicu reaksi dan difusi.
  - c. Fasa aluminida terbentuk langsung pada substrat atau sebagai lapisan.
- Keunggulan: Dapat menghasilkan lapisan tipis, mikrostruktur halus, dan gradien fungsional.

## 5. Metode Hidrid (Hydride Cycle)

- Prinsip: Hidrid logam (misal TiH<sub>2</sub>, ZrH<sub>2</sub>) dicampur dengan Al, dipanaskan sehingga hidrogen terlepas dan logam aktif langsung bereaksi dengan Al membentuk aluminida tanpa peleburan.
- Keunggulan: Suhu lebih rendah (~1000°C), proses cepat, ramah lingkungan.

## Proses Pembentukan Aluminida

**Tabel 4: Metode pembentukan aluminida, bahan awal, suhu, dan keunggulan**

Metode	Bahan Awal	Suhu (°C)	Produk Utama	Keunggulan/ Catatan
Reduksi aluminotermik	Oksida logam + Al	>1000	Bulk aluminida	Efisien, satu tahap
Pack cementation	Logam + serbuk Al	900–1000	Lapisan aluminida	Lapisan multi-lapis
Sintering reaktif	Bubuk logam + Al	800–1200	Bulk/komposit	Mikrostruktur terkontrol
In-situ/AM/Plasma	Serbuk/wire Al + logam	600–1200	Lapisan aluminida	Lapisan tipis, gradien
Hidrid cycle	Hidrid logam + Al	~1000	Bulk aluminida	Proses cepat, ramah lingkungan

- Fasa aluminida yang terbentuk sangat tergantung pada komposisi, suhu, dan waktu proses. Fasa awal biasanya yang kaya Al (misal Al<sub>3</sub>Ni, Al<sub>3</sub>Ti), lalu berkembang ke fasa lain sesuai difusi dan kinetika.
- Proses difusi dan pertumbuhan lapisan mengikuti hukum parabolik, dengan Al sebagai spesies yang paling aktif berdifusi.
- Metode modern seperti ion radiation dan additive manufacturing memungkinkan kontrol mikrostruktur dan sifat lapisan aluminida yang lebih baik.



#### 4. KESIMPULAN

Material paduan berbasis aluminida, seperti TiAl, NiAl, dan FeAl, menunjukkan potensi besar untuk aplikasi suhu tinggi di sektor penerbangan dan luar angkasa, berkat ketahanan oksidasi dan sifat mekaniknya yang unggul. Meskipun tantangan utama terkait keuletan pada suhu ruang dan optimasi adhesi pelapis masih ada, modifikasi komposisi dan penerapan metode pelapisan canggih dapat meningkatkan performa material ini. Penelitian ini mengusulkan optimasi komposisi berbasis sumber daya lokal Indonesia, yang diharapkan dapat mendukung kemandirian industri material suhu tinggi, mengurangi ketergantungan pada impor, dan memperkuat daya saing industri dirgantara nasional.

#### 5. REFERENSI

- Aritonang, S., & Murniati, R. (2024). *Material Pertahanan* (M. S. Dr. Ir. Sovian Aritonang, S.Si. & M. S. Dr. Riri Murniati, S.Si. (eds.)). CV. Aksara Global Akademia.
- Authors: M. Krasniqi, F. L. (2024). Comprehensive study on statistical methods for optimization of process parameters and material properties of AlSi10Mg in laser powder bed fusion. *Discover Mechanical Engineering*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s44245-024-00073-4>
- Bünck, M., Salber, R., & Stoyanov, T. (2024). Resource-Efficient Manufacturing Technology for Titanium Aluminide Aerospace Components. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*, 9(1), 141–154. <https://doi.org/10.1007/s41403-023-00436-5>
- Hadining, W. N., & Basuki, E. A. (2023). Pengaruh Pelapisan Aluminida Paduan Ti-47Al-2Nb-2Cr-0,5Zr-0,5Y terhadap Oksidasi Siklik pada Temperatur 900, 1000, dan 1100°C. *Journal of Metallurgical Engineering and Processing Technology*, 3(2), 146. <https://doi.org/10.31315/jmept.v3i2.8582>
- Ir. Zufri Hasrudy Siregar, S.T., M.Eng., C. E., Azhar Aras Mubarak, S.T., M. T., Yuvita Satriani Djuli, S.T., M. T., Hery Irwan, S.T., M.T., P. D., Dr. Ir. M. Ansyar Bora, S.T, M.T., I., Dr. Ir. Abdullah Merjani, S.T., M. T., Ir. Aulia Agung Dermawan, M. T., Fahriadi Pakaya, M. T., & Firman Edi, S.T., M. T. (2025). *Pengantar Teknik Mesin dan Industri*. Yayasan Tri Edukasi Ilmiah.
- Kopec, M. (2024a). Effect of Aluminide Coating Thickness on High-Temperature Fatigue Response of MAR-M247 Nickel-Based Superalloy. *Coatings*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/coatings14081072>
- Kopec, M. (2024b). Recent Advances in the Deposition of Aluminide Coatings on Nickel-Based Superalloys: A Synthetic Review (2019–2023). *Coatings*, 14(5), 1–15. <https://doi.org/10.3390/coatings14050630>
- Kulkarni, A., Srinivasan, D., Ravanappa, P., Jayaram, V., & Kumar, P. (2023). Creep behavior of additively manufactured high strength A205 aluminum alloy. *Additive Manufacturing Letters*, 6(April), 100142. <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2023.100142>
- Kumar, R., Singh Raman, R. K., Bakshi, S. R., Raja, V. S., & Parida, S. (2024). Exploring the Influence of Nanocrystalline Structure and Aluminum Content on High-Temperature Oxidation Behavior of Fe-Cr-Al Alloys. *Materials*, 17(7). <https://doi.org/10.3390/ma17071700>
- Li, Y., Dai, J., & Song, Y. (2021). Research Progress of First Principles Studies on Oxidation Behaviors of Ti-Al Alloys and Alloying Influence. *Metals*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/met11060985>
- Polozov, I., Sokolova, V., Gracheva, A., & Popovich, A. (2023). Tailoring the Microstructure of Laser-Additive-Manufactured Titanium Aluminide Alloys via In Situ Alloying and Parameter Variation. *Metals*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/met13081429>
- Schulze, L., Tóth, T., Beverförden, J., Hilbig, K., Vietor, T., & Dilger, K. (2025). Influence of Manufacturing Parameters on Mechanical Properties and Porosity of Additive-Manufactured and TIG-Welded AlSi10Mg Components. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(11), 1–21. <https://doi.org/10.3390/jmmp9110366>
- Siregar, Z. H., Jufrizal, Hasanah, M., & Muhammad Dendy Agusdiandy. (2022). Pengaruh Variasi Temperatur Sumber Panas Terhadap Temperatur Udara Dalam Heater Mesin Stirling. *IRA Jurnal Teknik Mesin Dan Aplikasinya (IRAJTMA)*, 1(1), 11–16. <https://doi.org/10.56862/irajtma.v1i1.1>
- Siregar, Z. H., Mawardi, M., Ramadhan, A., Rigitta, P., Simorangkir, S. P., & Harahap, D. S. (2024). Analisis Impak

- Tegangan dan Regangan pada Spesimen Batang Marka Jalan Menggunakan Air Gun Compressor. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 8(1), 396–407. <https://doi.org/10.33379/gtech.v8i1.3787>
- Trianah, M., Wijaya Saputra, D., & Irnaningsih, S. (2024). Pengaruh Sejarah Perkembangan Alat Transportasi Darat, Laut, dan Udara di Indonesia serta Dampaknya terhadap Masyarakat. *Seminar Nasional Pendidikan*, 2584–2592. <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/SEMNASFIP/article/view/24066>
- Utama, B. D. (2021). Perkembangan Industri Penerbangan Dan Pertumbuhan Ekonomi Di Indonesia. *Jurnal Ilmu Pemerintahan Suara Khatulistiwa*, 6(2), 213–223. <https://doi.org/10.33701/jipsk.v6i2.1901>
- Wang, L., Shen, C., Zhang, Y., Li, F., Zhou, W., Zhang, D., Wu, K., Ruan, G., Ding, Y., Li, Y., Li, H., & Hua, X. (2025). Materials & Design Defects , microstructure and properties in additive manufacturing of TiAl alloys: Formation mechanisms , influencing factors and improvement strategies. *Materials & Design*, 256(April), 114235. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.114235>
- Wei, Y., Miao, B., Shu, S., Yang, H., & Zhong, X. (2025). Opening the future of lightweight: Research progress in additive manufacturing of TiAl alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 39(5988), 5391–5414. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.10.162>