

**STUDI KETAHANAN DAN KERUSAKAN *TUNGSTEN BOAT*
PADA *METAL THERMAL EVAPORATOR* TANPA VAKUM
DENGAN PENDEKATAN *THERMAL ANALYSIS* DAN
KOMPOSISI UNSUR KIMIA**

Tugas Akhir

Disusun sebagai salah satu syarat untuk
menyelesaikan pendidikan Sarjana Terapan Diploma IV

Oleh

Ilham Muhamad Ramdhan

221411017



**PROGRAM STUDI TEKNOLOGI REKAYASA MANUFAKTUR
JURUSAN TEKNIK MANUFAKTUR
POLITEKNIK MANUFAKTUR BANDUNG**

2025

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas Akhir yang berjudul:

**STUDI KETAHANAN DAN KERUSAKAN *TUNGSTEN BOAT* PADA
METAL THERMAL EVAPORATOR TANPA VAKUM DENGAN
PENDEKATAN *THERMAL ANALYSIS* DAN KOMPOSISI UNSUR KIMIA**

Oleh:

Ilham Muhamad Ramdhan

221411017

Telah direvisi, disetujui, dan disahkan sebagai Tugas Akhir penutup program
pendidikan Sarjana Terapan (Diploma IV)
Politeknik Manufaktur Bandung

Bandung, 5 Agustus 2025

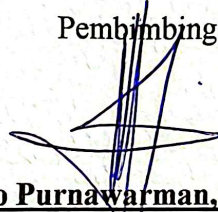
Disetujui,

Pembimbing I,



Dhion Khairul Nugraha, S.T., M.T.
NIP. 199003102022031002

Pembimbing II,



Otto Purnawarman, S.T., M.T.
NIP. 196207101989031004

Disahkan,
Penguji I,



Haris Setiawan, SST., M.T
NIP. 197512042001121001

Penguji II,



Marta Hayu Raras S.R.S, S.T., M.Sc
NIP. 199407302024062001

Penguji III,



Dr. Herman Budi Harja, ST., MT
NIP. 197902022008101001

PERNYATAAN ORISINALITAS

Sebagai Civitas Akademika Politeknik Manufaktur Bandung, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Ilham Muhamad Ramdhan
NIM : 221411017
Jurusan : Teknik Manufaktur
Program Studi : Teknologi Rekayasa Manufaktur
Jenjang Studi : Diploma 4
Jenis Karya : Tugas Akhir
Judul Karya : STUDI KETAHANAN DAN KERUSAKAN
TUNGSTEN BOAT PADA *METAL THERMAL*
EVAPORATOR TANPA VAKUM DENGAN
PENDEKATAN *THERMAL ANALYSIS* DAN
KOMPOSISI UNSUR KIMIA

Menyatakan bahwa:

1. Tugas akhir ini adalah hasil karya saya sendiri (orisinal) atas bimbingan para Pembimbing.
2. Dalam tugas akhir ini tidak terdapat keseluruhan atau sebagian tulisan orang lain yang saya ambil dengan cara menyalin atau meniru dalam bentuk rangkaian kalimat atau simbol yang menunjukkan gagasan atau pendapat atau pemikiran dari penulis lain, yang saya akui seolah-olah sebagai tulisan saya sendiri, dan/atau tidak terdapat bagian atau keseluruhan tulisan yang saya salin, tiru, atau yang saya ambil dari tulisan orang lain tanpa memberikan pengakuan penulis aslinya (referensi).
3. Bila kemudian terbukti bahwa saya melakukan tindakan yang bertentangan dengan hal tersebut di atas, baik disengaja atau tidak, saya bersedia menerima akibatnya sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Bandung
Pada tanggal : 5 Agustus 2025
Yang Menyatakan,

Ilham Muhamad Ramdhan
NIM 221411017

PERNYATAAN HAK KEKAYAAN INTELEKTUAL (HKI)

Sebagai Civitas Akademika Politeknik Manufaktur Bandung, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Ilham Muhamad Ramdhan
NIM : 221411017
Jurusan : Teknik Manufaktur
Program Studi : Teknologi Rekayasa Manufaktur
Jenjang Studi : Diploma 4
Jenis Karya : Tugas Akhir
Judul Karya : *STUDI KETAHANAN DAN KERUSAKAN TUNGSTEN BOAT PADA METAL THERMAL EVAPORATOR TANPA VAKUM DENGAN PENDEKATAN THERMAL ANALYSIS DAN KOMPOSISI UNSUR KIMIA*

Menyatakan/menyetujui bahwa:

1. Segala bentuk Hak Kekayaan Intelektual terkait dengan tugas akhir tersebut menjadi milik Institusi Politeknik Manufaktur Bandung, yang selanjutnya pengelolaanya berada dibawah Jurusan dan Program Studi, dan diatur sesuai dengan ketentuan yang berlaku.
2. Memberikan kepada Politeknik Manufaktur Bandung Hak Bebas Royalti Noneklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right) atas hasil tugas akhir saya tersebut. beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini, maka Politeknik Manufaktur Bandung berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama-nama Dosen Pembimbing dan nama saya sebagai anggota penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Bandung
Pada tanggal : 5 Agustus 2025
Yang Menyatakan,

Ilham Muhamad Ramdhan
NIM 221411017

MOTO PRIBADI

"Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan."

(QS. Al-Insyirah: 6)

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah yang hanya kepadaNya kami memuji, memohon pertolongan, dan mohon keampunan. Kami berlindung kepadaNya dari kekejian diri dan kejahatan amalan kami. Barang siapa yang diberi petunjuk oleh Allah maka tidak ada yang dapat menyesatkan, dan barang siapa yang tersesat dari jalanNya maka tidak ada yang dapat memberinya petunjuk. Dan aku bersaksi bahwa tiada sembahyan yang berhak disembah melainkan Allah saja, yang tiada sekutu bagiNya. Dan aku bersaksi bahwa Muhammad adalah hambaNya dan RasulNya.

Atas petunjuk dan pertolongan-Nya, Alhamdulillah penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul: “STUDI KETAHANAN DAN KERUSAKAN TUNGSTEN BOAT PADA METAL THERMAL EVAPORATOR TANPA VAKUM DENGAN PENDEKATAN THERMAL ANALYSIS DAN KOMPOSISI UNSUR KIMIA”.

Tugas akhir dibuat dalam rangka memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan Sarjana Terapan (Diploma-IV) pada Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur di Politeknik Manufaktur Bandung.

Terselesaikannya tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan banyak pihak, sehingga pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati dan penuh rasa hormat penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya bagi semua pihak yang telah memberikan bantuan moril maupun materiel baik langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan skripsi ini hingga selesai, terutama kepada yang saya hormati:

1. Direktur Politeknik Manufaktur Bandung, Bapak Darma Firmansyah U., S.ST., M.T.
2. Ketua Jurusan Teknik Manufaktur, Bapak Dr. Herman Budi Harja, ST., MT.
3. Ketua Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur, Bapak Dr. Heri Setiawan, ST., MT.
4. Pembimbing tugas akhir, Bapak Dhion Khairul Nugraha, S.T.,M.T. dan Bapak Otto Purnawarman, S.T., M.T.

5. Para Penguji sidang tugas akhir Bapak Andri Pratama, SST.,M.Sc, Ibu Marta Hayu Raras Sita Rukmika Sari, S.T., M.Sc., dan Bapak Dr. Herman Budi Harja, ST., MT
6. Panitia tugas akhir, Bapak Ilham Ali A, S.Tr.T., M.T.
7. Teristimewa kepada Orang Tua penulis Ibu Siti Hasanah dan Bapak Ece Saripudin yang selalu mendoakan, memberikan motivasi dan pengorbanannya baik dari segi moril, materi kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
8. Adik penulis, Iqbal Muhamad Al-Rifqi yang selalu memberikan dukungan kepada penulis.
9. Buat sahabat seperjuangan tugas akhir penulis, Kaka Pratama.
10. Sahabat-sahabat mahasiswa kelas 4MED, 4MEE & 5MEG yang telah memberikan dukungan, kerja sama dan bersama-sama berjuang dalam menyelesaikan pendidikan di Politeknik Manufaktur Bandung.
11. Rekan-rekan mahasiswa jurusan Teknik Manufaktur.
12. Serta seluruh pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Akhir kata penulis menyadari bahwa dalam penulisan tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Karena itu, penulis memohon saran dan kritik yang sifatnya membangun demi kesempurnaannya dan semoga bermanfaat bagi kita semua. Aamiin Ya Robbal Alamin.

Bandung, 5 Agustus 2025

Ilham Muhamad Ramdhan

ABSTRAK

Proses pelapisan film tipis dengan metode *Physical Vapor Deposition* (PVD) memiliki peran penting dalam industri elektronik, optik, dan manufaktur. Namun, permasalahan sering timbul pada sistem pemanas (*heater*) *metal thermal evaporator*, seperti patahnya elemen pemanas. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji ketahanan dan kerusakan *tungsten boat* dalam kondisi tanpa vakum, dengan pendekatan *thermal analysis* dan analisis komposisi unsur kimia. Pendekatan yang digunakan untuk mengetahui penyebab kerusakan *tungsten boat* dengan fokus pada faktor-faktor seperti *thermal stress*, oksidasi, dan *thermal cycling fatigue*. Pengujian dilakukan melalui simulasi *thermal expansion* menggunakan *SolidWorks*, pengamatan unsur kimia dan struktur mikro melalui EDS (*Energy Dispersive Spectrometry*) dan SEM (*Scanning Electron Microscope*), serta eksperimen pemanasan menggunakan *tungsten boat*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa desain pemanas alternatif (*step type*) memberikan distribusi panas yang lebih merata dan ketahanan struktural yang lebih baik dari desain awal yang digunakan (*straight type*). Secara eksperimental, *tungsten boat* menunjukkan batas ketahanan maksimum hingga empat siklus pemanasan dengan rata-rata suhu puncak 1052 °C sebelum mengalami kerusakan struktural. Hasil uji EDS menunjukkan adanya unsur oksigen yang signifikan pada area retakan, yang mengindikasikan pembentukan senyawa oksida (WO_3) sebagai akibat dari eksposur udara pada suhu tinggi. Mikro struktur pada area tersebut menunjukkan batas butir yang rapuh dan potensi inisiasi retakan mikro. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa ketahanan *tungsten boat* sangat dipengaruhi oleh kombinasi antara *thermal cycling*, distribusi suhu yang tidak merata, serta oksidasi permukaan yang mempercepat kerusakan pada suhu tinggi dalam kondisi non-vakum.

Kata kunci: *Tungsten boat*, *Metal thermal evaporator*, ketahanan termal, kerusakan material, *thermal analysis* SEM-EDS, *thermal stress*, oksidasi, non-vakum.

ABSTRACT

The thin-film coating process using the Physical Vapor Deposition (PVD) method plays a crucial role in the electronics, optics, and manufacturing industries. However, challenges often arise in the heating system of the metal thermal evaporator, particularly the failure of the heating element. This study aims to evaluate the thermal endurance and failure behavior of tungsten boats under non-vacuum conditions using thermal analysis and chemical composition characterization. The analysis focuses on determining the contributing factors to tungsten boat failure, including thermal stress, oxidation, and thermal cycling fatigue. Experimental procedures were conducted through thermal expansion simulations using SolidWorks, chemical and microstructural analysis using Energy Dispersive Spectrometry (EDS) and Scanning Electron Microscope (SEM), as well as heating experiments using tungsten boats. The simulation results showed that the alternative heater design (step type) provides a more uniform heat distribution and better structural stability than the original design (straight type). Experimentally, the tungsten boat demonstrated a maximum thermal endurance of up to four heating cycles with an average peak temperature of 1052 °C before exhibiting structural damage. EDS analysis revealed a significant presence of oxygen at the crack area, indicating the formation of tungsten oxide (WO₃) due to exposure to air at high temperatures. The microstructure in this area showed brittle grain boundaries and potential sites for microcrack initiation. It can be concluded that the thermal endurance of the tungsten boat is strongly affected by the combination of repeated thermal cycling, uneven heat distribution, and surface oxidation, which accelerates material degradation at elevated temperatures under non-vacuum conditions.

Keywords: Tungsten boat, metal thermal evaporator, thermal endurance, material failure, thermal analysis, SEM-EDS, thermal stress, oxidation, non-vacuum.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
PERNYATAAN HAK KEKAYAAN INTELEKTUAL (HKI).....	iii
MOTO PRIBADI	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK	vii
<i>ABSTRACT</i>	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN	xvi
I BAB I PENDAHULUAN.....	I-1
I.1 Latar Belakang	I-1
I.2 Rumusan Masalah	I-4
I.3 Batasan Masalah.....	I-4
I.4 Tujuan dan Manfaat	I-5
I.5 Sistematika Penulisan.....	I-6
II BAB II TINJAUAN PUSTAKA	II-1
II.1 Pelapisan Material.....	II-1
II.2 Lapisan Film Tipis	II-4
II.3 <i>Physical Vapor Deposition</i>	II-6
II.4 Metal Thermal Evaporator	II-9
II.5 Sistem Pemanas.....	II-11

II.6	Sistem Vakum	II-18
II.7	Oksidasi Material	II-19
II.8	<i>Thermal Stress and Thermal Expansion</i>	II-21
II.9	<i>Thermal Cycling Fatigue</i>	II-24
II.10	Hubungan antara Arus dengan Panas.....	II-25
II.11	Analisis Termal (<i>Thermal Analysis</i>)	II-26
II.12	Analisis Komposisi Unsur Kimia (EDS)	II-27
II.13	Studi Penelitian Terdahulu	II-28
III BAB III METODOLOGI PENYELESAIAN MASALAH		III-1
III.1	Jenis dan Pendekatan Penelitian.....	III-1
III.2	Tempat Penelitian.....	III-1
III.3	Alat dan Bahan.....	III-2
III.3.1	Alat.....	III-2
III.3.2	Bahan.....	III-2
III.4	Variabel Penelitian	III-2
III.5	Prosedur Pengambilan Data Arus, Suhu, dan Waktu Pemanasan.....	III-2
III.6	Prosedur Penelitian.....	III-3
III.7	Instrumen Penelitian.....	III-5
III.8	Sumber Data Penelitian.....	III-5
III.9	Metode Pengumpulan Data	III-5
IV BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		IV-1
IV.1	Analisis Hasil EDS <i>Tungsten boat</i>	IV-1
IV.1.1	<i>Tungsten boat</i> Sebelum Pengujian.....	IV-1
IV.1.2	Oksidasi <i>Tungsten boat</i>	IV-3
IV.2	Evaluasi Sistem Vakum	IV-4
IV.2.1	Penyebab Utama Sistem Tidak Vakum:	IV-7

IV.3	Simulasi Ekspansi Termal.....	IV-9
IV.3.1	Desain Awal <i>Tungsten boat</i>	IV-11
IV.3.2	Desain Alternatif <i>Tungsten boat</i>	IV-13
IV.4	Pengujian Sistem Pemanas untuk Monitoring Temperatur.....	IV-16
IV.5	Analisis Penyebab Kerusakan pada <i>Tungsten boat</i>	IV-22
IV.6	Analisis Pencekaman <i>Tungsten boat</i>	IV-30
V	BAB V PENUTUP	V-1
V.1	Kesimpulan	V-1
V.2	Saran.....	V-2
	DAFTAR PUSTAKA	iii

DAFTAR TABEL

Tabel II. 1	Macam-macam proses <i>coating</i> atau pelapisan material	II-1
Tabel II. 2	Rentang tingkat kevakuman menurut John F. O'Hanlon	II-18
Tabel IV. 1	Hasil EDS Pada Sampel Lapisan Film Tipis [39].....	IV-5
Tabel IV. 2	Data perhitungan.....	IV-10
Tabel IV. 3	Data perhitungan.....	IV-11
Tabel IV. 4	Data hasil percobaan.....	IV-19
Tabel IV. 5	Rata-rata suhu	IV-19
Tabel IV. 6	Validasi Persamaan Regresi dan Perhitungan Error	IV-20
Tabel IV. 10	Perubahan Visual <i>Tungsten boat</i> selama Siklus Pemanasan Berulang	IV-29

DAFTAR GAMBAR

Gambar II. 1 <i>The vacuum evaporation PVD process</i> [9].....	II-6
Gambar II. 2 Skema Sistem Evaporasi [15].....	II-9
Gambar II. 3 Perpindahan Panas Konduksi	II-12
Gambar II. 4 Perpindahan Panas Konveksi.....	II-12
Gambar II. 5 Perpindahan Panas radiasi	II-13
Gambar II. 6 Pemanasan resistif	II-14
Gambar II. 7 Pemanasan induksi	II-14
Gambar II. 8 <i>Electron Beam Heating</i>	II-15
Gambar II. 9 <i>Tungsten boat</i>	II-15
Gambar II. 10 Tungsten Filament.....	II-16
Gambar II. 11 Crucible Heater.....	II-16
Gambar II. 12 <i>Evaporation Basket Heater</i>	II-16
Gambar II. 13 <i>Energy Dispersive Spectrometry (EDS)</i>	II-27
Gambar III. 1 Diagram Alir Tugas Akhir	III-3
Gambar IV. 1 <i>Tungsten boat</i> sebelum pengujian.....	IV-1
Gambar IV. 2 Hasil EDS pada permukaan <i>tungsten boat (Selected Area 1)</i>	IV-2
Gambar IV. 3 Spektrum EDS Tungsten Murni pada <i>Boat Heater</i>	IV-2
Gambar IV. 4 Spektrum EDS <i>Substrat Kaca</i> Setelah Evaporasi	IV-3
Gambar IV. 5 Tingkat kevakuman 70 cmHg [39]	IV-5
Gambar IV. 6 OERLIKON leybold vacuum trivac D 2,5 E.....	IV-7
Gambar IV. 7 Spesifikasi dari pompa vakum	IV-7
Gambar IV. 8 <i>turbo-molecular pump Edwards nEXT240D</i>	IV-8
Gambar IV. 9 <i>Conflat Flange</i>	IV-8
Gambar IV. 10 Dimensi <i>Tungsten boat</i> satuan mm.....	IV-9
Gambar IV. 11 Simulasi Ekspansi Termal Pada Desain Tungsten 1 (<i>Straight type</i>)	IV-12
Gambar IV. 12 Simulasi ekspansi termal percobaan ke 2 pada Desain Tungsten 1 (<i>Straight type</i>).....	IV-13
Gambar IV. 13 Dimensi pada desain <i>Tunsten boat 2 (step type)</i> dalam mm...IV-14	

Gambar IV. 14 Simulasi Ekspansi Termal Pada Desain Tungsten 2 (<i>Step type</i>).	IV-15
Gambar IV. 15 Hasil kalibrasi pada thermogun.....	IV-18
Gambar IV. 16 Acuan suhu pada thermocouple saat kalibrasi	IV-18
Gambar IV. 17 Kurva Regresi Polynomial Rata-Rata Suhu terhadap Arus	IV-21
Gambar IV. 18 Tampilan suhu pada LCD sistem saat arus 10 Ampere, menunjukkan suhu aktual 436°C.	IV-22
Gambar IV. 19 Tampilan suhu pada LCD sistem saat arus 90 Ampere, menunjukkan suhu maksimum 1052°C.	IV-22
Gambar IV. 20 Tungsten mulai teroksidasi (berasap)	IV-23
Gambar IV. 21 Hasil EDS yang memperlihatkan retakan mikro dan unsur kimia dalam Tungsten yang sudah diuji.....	IV-25
Gambar IV. 22 Hasil EDS pada Tungsten (<i>Selected Area 1</i>)	IV-25
Gambar IV. 23 Hasil EDS pada Tungsten (<i>Selected Area 3</i>)	IV-26
Gambar IV. 24 Hasil Pengujian Mikro Struktur Pada 150x	IV-27
Gambar IV. 25 Hasil Pengujian Mikro Struktur Pada 450x	IV-27
Gambar IV. 26 Skematik Proses Terjadinya Busur Listrik (<i>Electrical Arcing</i>) pada Celah Udara antara Katoda dan Anoda.....	IV-31
Gambar IV. 27 Percobaan pencekaman longgar.....	IV-33
Gambar IV. 28 Hasil percobaan pencekaman longgar.....	IV-33
Gambar IV. 29 Distribusi panas pada salah satu pencekaman longgar	IV-34

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1** Kalibrasi *Thermogun* Terhadap *Thermocouple*
- Lampiran 2** Data Percobaan Pada Material Tembaga Dan *Tungsten boat*
- Lampiran 3** Rekomendasi *Turbo Molecular Pump*
- Lampiran 4** Parameter simulasi di *Solidworks*
- Lampiran 5** Hasil Pengujian EDS Pada *Tungsten boat*

DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

Simbol/Singkatan	Keterangan	Satuan
L0	Panjang awal material	mm
ΔL	Pertambahan panjang (ekspansi termal)	mm
α	Koefisien muai panjang	1/°C atau °C ⁻¹
ΔT	Perubahan suhu	°C
E	Modulus elastisitas material	Pa (atau GPa)
σ	Tegangan termal	Pa (atau MPa/GPa)
T	Suhu atau temperatur	°C
A	Arus listrik	Ampere (A)
V	Tegangan listrik / beda potensial	Volt (V)
R	Hambatan listrik	Ohm (Ω)
t	Waktu	detik (s)
Q	Energi panas (<i>Joule heating</i>)	Joule (J)
WO ₃	Tungsten trioksida (hasil oksidasi tungsten)	-
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i> (Metode pelapisan film tipis)	-
TCF	<i>Thermal Cycling Fatigue</i> (Kelelahan akibat siklus termal)	-
FEM	<i>Finite Element Method</i> (Metode Elemen Hingga, pada simulasi)	-
<i>SolidWorks</i>	Perangkat lunak simulasi CAD dan analisis struktur	-
<i>Thermocouple</i>	Sensor suhu berbasis perbedaan tegangan termoelektrik	-
<i>Thermogun</i>	Alat ukur suhu inframerah	-
<i>MTE</i>	<i>Metal Thermal Evaporator</i>	-
<i>SEM</i>	<i>Scanning Electron Microscope</i>	-
<i>EDS</i>	<i>Energy Dispersive Spectrometry</i>	-
R ²	Koefisien Determinasi (<i>Coefficient of Determination</i>)	-

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Kemajuan teknologi sudah semakin pesat, salah satunya dalam bidang pelapisan material. Teknologi ini erat kaitannya dengan nanoteknologi, khususnya teknologi yang berkaitan dengan lapisan film tipis. Lapisan film tipis merupakan lapisan yang dihasilkan melalui proses evaporasi *substrat*, dengan ketebalan berkisar dari mikrometer hingga nanometer. Teknologi lapisan tipis banyak digunakan pada peralatan semikonduktor untuk keperluan komponen elektronik. Proses pembuatan lapisan ini melibatkan penguapan material pelapis yang kemudian mengendap pada permukaan *substrat*.

Salah satu metode yang banyak digunakan adalah *Physical Vapor Deposition* (PVD), yang memungkinkan pembuatan lapisan tipis dengan sifat-sifat tertentu melalui proses penguapan material dalam kondisi vakum. Proses ini tidak hanya meningkatkan ketahanan terhadap korosi dan aus, tetapi juga memperbaiki aspek estetika dari produk. Dengan meningkatnya permintaan untuk lapisan berkualitas tinggi di berbagai sektor, termasuk elektronik, otomotif, dan kesehatan, penelitian mengenai teknik pelapisan yang efisien dan efektif menjadi semakin relevan.

Lapisan tipis dan murni pada komponen elektronik sangat penting untuk meningkatkan efisiensi dan daya tahan perangkat. Lapisan ini berfungsi sebagai isolator, pelindung, dan penghubung yang dapat mempengaruhi kinerja keseluruhan dari komponen elektronik. Dengan menggunakan lapisan yang murni, kita dapat meminimalkan resistansi listrik dan meningkatkan konduktivitas, yang sangat penting dalam aplikasi seperti sirkuit terpadu dan perangkat semikonduktor. Selain itu, lapisan tipis yang berkualitas tinggi juga dapat mengurangi kerusakan akibat korosi dan meningkatkan ketahanan terhadap suhu ekstrem, sehingga memperpanjang umur komponen. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan teknik pelapisan seperti *Physical Vapor Deposition* (PVD) dapat menghasilkan

lapisan yang seragam dan memiliki sifat mekanik yang unggul, menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi elektronik modern [1], [2].

Namun, dalam praktiknya, penggunaan sistem pemanas pada proses *Physical Vapor Deposition* (PVD) sering kali menghadapi berbagai tantangan, terutama ketika suhu operasi mencapai kondisi ekstrem di atas 1000°C. Salah satu permasalahan yang umum terjadi adalah kerusakan atau patahnya elemen pemanas, khususnya *tungsten boat*, selama proses evaporasi berlangsung. Penelitian oleh [3] menunjukkan bahwa *tungsten boat* dapat mengalami kegagalan struktural akibat beban termal yang tinggi selama siklus pemanasan berulang. Dalam beberapa kasus, material *boat* dilaporkan mengalami retak saat proses evaporasi berlangsung apabila tidak dirancang dengan material atau geometri yang memadai untuk menahan ekspansi termal yang terus-menerus. Temuan ini menekankan pentingnya desain *heater* yang tepat dan pengendalian parameter proses sebagai upaya untuk meminimalkan risiko kegagalan sistem pemanas selama pelapisan film tipis dengan metode PVD.

Berdasarkan kondisi tersebut, salah satu fokus penelitian ini untuk menganalisis penyebab utama kerusakan pada sistem pemanas *Metal Thermal Evaporator*, khususnya pada elemen *tungsten boat* yang menjadi komponen inti dalam proses pemanasan. Analisis dilakukan melalui pendekatan *thermal analysis* dan karakterisasi unsur kimia menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan EDS (*Energi Dispersive spectrometry*), untuk mengkaji secara menyeluruh faktor-faktor yang memicu kerusakan material. Selain kerusakan, aspek ketahanan elemen *tungsten boat* terhadap siklus pemanasan ekstrem di atas 1000°C dalam kondisi tanpa vakum juga menjadi perhatian penting. Mengetahui batas maksimum suhu dan jumlah siklus yang dapat ditahan *heater* sebelum mengalami degradasi merupakan langkah strategis untuk mengetahui umur pakai *tungsten boat* terutama dalam kondisi tanpa vakum.

Dalam penelitian sebelumnya, sistem pemanas pada *Metal Thermal Evaporator* (MTE) mengalami kerusakan struktural berupa patahnya *tungsten boat* setelah siklus pemanasan keempat. Hal ini menunjukkan bahwa elemen pemanas mengalami degradasi akibat paparan suhu tinggi secara berulang dalam waktu

relatif singkat. Temuan ini mengindikasikan adanya permasalahan pada ketahanan material terhadap siklus termal, yang berpotensi disebabkan oleh tegangan termal, oksidasi, atau desain pemanas yang kurang optimal.

Selain itu, sistem monitoring suhu yang digunakan saat itu belum mampu mengukur suhu permukaan tungsten secara langsung, karena *thermocouple* yang digunakan hanya membaca suhu ruang. Sebagai ilustrasi, saat pengujian, *thermocouple* hanya mencatat suhu sekitar 80°C, sedangkan pengukuran menggunakan *thermogun* pada permukaan tungsten menunjukkan suhu mendekati 800°C. Ketidaktepatan ini menandakan bahwa sistem monitoring belum memberikan data suhu yang representatif pada titik kritis proses evaporasi.

Di sisi lain, sistem vakum yang digunakan juga belum mencapai kondisi ideal. Tingkat kevakuman hanya berada pada 70 cmHg (sekitar 92% dari tekanan atmosfer standar 76 cmHg), yang berpotensi meningkatkan keberadaan gas residu, terutama oksigen. Hal ini dapat mempercepat terjadinya oksidasi permukaan tungsten dan berkontribusi terhadap kerusakan material pemanas.

Dari ketiga permasalahan yang diidentifikasi—yakni kerusakan *heater*, keterbatasan akurasi monitoring suhu, dan kevakuman yang tidak optimal—Penelitian ini secara khusus difokuskan untuk menganalisis penyebab utama kerusakan serta ketahanan elemen pemanas (*heater*), khususnya *tungsten boat*, terhadap siklus pemanasan dalam kondisi tanpa vakum. Analisis ini akan dilakukan melalui pendekatan *thermal analysis* dan komposisi unsur kimia untuk mengkaji peran tegangan termal, oksidasi, serta distribusi panas terhadap kegagalan material. Dengan demikian, hasil penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai mekanisme kerusakan yang terjadi, serta menjadi dasar pertimbangan dalam pemilihan desain dan jenis *heater* yang lebih tahan terhadap kondisi operasi ekstrem. Selain itu, hasil penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam merumuskan langkah-langkah preventif guna memperpanjang umur pakai *heater* yang digunakan pada proses PVD di masa mendatang.

I.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang diidentifikasi berdasarkan latar belakang yang telah disusun adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil simulasi *therma expansion* terhadap desain *tungsten boat* pada *Metal Thermal Evaporator*?
2. Bagaimana pengaruh mekanisme pencekaman terhadap kestabilan termal dan distribusi panas dalam sistem *Metal Thermal Evaporator*?
3. Bagaimana hubungan antara nilai arus listrik, dan durasi pemanasan terhadap suhu yang dicapai pada sistem *Metal Thermal Evaporator*?
4. Apa saja faktor utama yang memengaruhi ketahanan dan menyebabkan kerusakan pada *tungsten boat* dalam kondisi non-vakum?

I.3 Batasan Masalah

Untuk menjaga fokus dan ruang lingkup penelitian agar tetap terarah, maka penelitian ini dibatasi pada hal-hal berikut:

1. Analisis difokuskan pada ketahanan dan kerusakan elemen pemanas berjenis *tungsten boat (straight type)* dalam sistem *Metal Thermal Evaporator*.
2. Penelitian ini menggunakan *tungsten boat tipe straight* sebagai objek utama dalam pengujian eksperimental. Sementara itu, tipe *step* hanya digunakan sebagai model pembanding dalam simulasi untuk menganalisis pengaruh desain *heater* terhadap distribusi panas dan ekspansi termal.
3. Hubungan antara arus, waktu pemanasan, serta suhu maksimal pengoperasian akan diamati secara eksperimental.
4. Sistem monitoring suhu yang dikembangkan hanya terbatas pada penggunaan Thermogun yang sudah dikalibrasi sebagai alat ukur, dengan tujuan untuk mengetahui suhu yang terdeteksi dan dikonversikan menjadi data suhu untuk di program menggunakan Arduino.
5. Seluruh pengujian dilakukan dalam kondisi tanpa vakum, dan data kevakuman yang digunakan dalam analisis hanya mengacu pada penelitian sebelumnya yang menunjukkan kevakuman maksimum sebesar 70 cmHg (92%). Penelitian ini bertujuan mengevaluasi ketahanan *tungsten boat* terhadap paparan panas dan atmosfer langsung.

6. Penelitian ini menggunakan pendekatan *thermal analysis* dan komposisi unsur kimia (SEM-EDS) untuk menganalisis permasalahan utama yang terjadi pada sistem pemanas.
7. Fokus pengujian dibatasi pada kondisi suhu diatas 1000°C, yang menjadi target operasional sistem pemanas yang dikembangkan.

I.4 Tujuan dan Manfaat

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Melakukan simulasi *thermal expansion* terhadap *heater Metal Thermal Evaporator* menggunakan perangkat lunak *SolidWorks Simulation* untuk memahami perilaku ekspansi termal dan distribusi suhu pada desain *tungsten boat (heater)* berjenis *straight type* dan *step type*.
2. Mengevaluasi pengaruh mekanisme pengekaman terhadap kestabilan termal dan distribusi panas, khususnya dalam menghindari konsentrasi tegangan termal yang dapat memicu kegagalan struktural.
3. Mengkaji hubungan antara nilai arus listrik, dan durasi pemanasan terhadap suhu akhir yang dicapai dalam sistem *Metal Thermal Evaporator*.
4. Menganalisis faktor-faktor utama yang memengaruhi ketahanan dan menyebabkan kerusakan pada *tungsten boat* dalam kondisi non-vakum, dengan meninjau peran *thermal stress*, oksidasi, dan *thermal cycling fatigue* sebagai penyebab dominan.

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan referensi ilmiah terkait studi ketahanan dan kerusakan *tungsten boat* dalam sistem *Metal Thermal Evaporator*.
2. Memberikan pemahaman yang lebih jelas tentang pemilihan jenis *tungsten boat* yang digunakan pada proses pelapisan film tipis menggunakan metode PVD, khususnya melalui pendekatan simulasi dan analisis eksperimental.
3. Memberikan pemahaman tentang cara pengekaman yang tepat pada saat proses evaporasi logam serta menunjukkan dampak negatif seperti distribusi panas yang tidak merata dan kerusakan pada *heater* jika pengekaman dilakukan secara longgar.

4. Mendukung pengembangan *prototype* mesin *Metal Thermal Evaporator* yang lebih baik, sehingga bisa digunakan kembali untuk penelitian lanjutan dalam bidang teknik pelapisan material.

I.5 Sistematika Penulisan

Sistematika proposal Tugas Akhir ini dibahas dengan penjabaran sebagai berikut.

BAB I PENDAHULUAN, berisi uraian mengenai latar belakang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA, berisi gambaran umum tentang landasan teori untuk menjelaskan beberapa istilah dan ilmu terkait serta melihat hasil pencapaian penelitian terdahulu dengan kajian yang sama.

BAB III METODOLOGI PENYELESAIAN MASALAH, berisi langkah-langkah penyelesaian tugas akhir berupa gambaran umum sistem serta perancangan sistem.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN, berisi hasil dan perhitungan terhadap pemilihan komponen-komponen penunjang fungsi terhadap kekuatan bahan.

BAB V PENUTUP, Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian yang mengacu pada tujuan yang telah ditetapkan, serta saran-saran untuk pengembangan.