

DISERTASI

**PENGERASAN PERMUKAAN TITANIUM MURNI
GRADE 1 DENGAN METODE POWDER NITRIDING
BERBAHAN UREA**

**Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Gelar Doktor Ilmu
Teknik Bidang Ilmu Teknik Mesin**



**ARIA WIRA YUDA
NIM. 03013682227001**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK/ PROGRAM DOKTOR
UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

2025

HALAMAN PENGESAHAN

**PENGERASAN PERMUKAAN TITANIUM MURNI GRADE 1
DENGAN METODE POWDER NITRIDING BERBAHAN UREA**

LAPORAN DISERTASI

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Gelar Doktor Ilmu Teknik,
Bidang Ilmu Teknik Mesin

Disusun oleh

Aria Wira Yuda
NIM. 03013682227001

Telah disetujui

Pada tanggal

Februari 2025

Ko-Promotor 1


Ir. Irsyadi Yani, S.T., M.Eng., Ph.D.

NIP. 197112251997021001

Ko-Promotor 2


Ir. Barlin, S.T., M.Eng., Ph.D.

NIP. 198106302006041001

Promotor,


Prof. Ir. Amir Arifin, S.T., M.Eng., Ph.D.

NIP. 197909272003121004


Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik,


Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, ST., MT., IPM

NIP. 197502112003121002

Koordinator Program Studi,


Prof. Dr. Ir. Nukman, MT

NIP. 195903211987031001

HALAMAN PERSETUJUAN

Dengan ini menyatakan bahwa disertasi Aria Wira Yuda yang berjudul "PENGKERASAN PERMUKAAN TITANIUM MURNI GRADE 1 DENGAN METODE POWDER NITRIDING BERBAHAN UREA" telah dipertahankan dihadapan sidang ujian tertutup Program Studi Teknik Program Doktor, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya pada tanggal 7 Februari 2025.

Palembang, 7 Februari 2025

Ditandatangani oleh Tim Penguji:

Prof. Dr. Ir. Nukman, MT

NIP. 195903211987031001



Anggota Tim Penguji:

1. Dr. H. Ismail Thamrin, S.T., M.T.

NIP. 197210081998022001

2. Zulkarnain, S.T., M.Sc., Ph.D.

NIP. 198105102005011005

3. Prof. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 197108171998021003




Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik,


Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, ST., MT., IPM
NIP. 197502112003121002

Koordinator Program Studi,


Prof. Dr. Ir. Nukman, MT
NIP. 195903211987031001

HALAMAN PERSETUJUAN

PENGERASAN PERMUKAAN TITANIUM MURNI GRADE 1 DENGAN METODE POWDER NITRIDING BERBAHAN UREA

LAPORAN DISERTASI

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Gelar Doktor Ilmu Teknik,
Bidang Ilmu Teknik Mesin

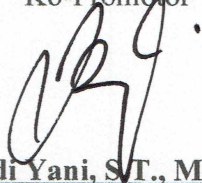
Disusun oleh

Aria Wira Yuda
NIM. 03013682227001

Telah disetujui

Pada tanggal Februari 2025

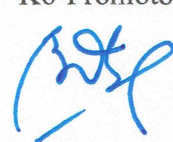
Ko-Promotor 1



Ir. Irsyadi Yani, S.T., M.Eng., Ph.D.

NIP. 197112251997021001

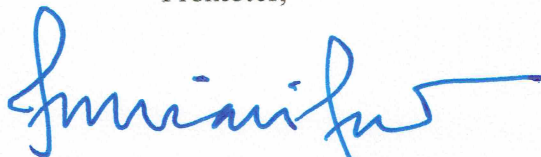
Ko-Promotor 2



Ir. Barlin, S.T., M.Eng., Ph.D.

NIP. 198106302006041001

Promotor,



Prof. Ir. Amir Arifin, S.T., M.Eng., Ph.D.

NIP. 197909272003121004

Pernyataan Orisinilitas / Pernyataan Plagiarisme

Nama : Aria Wira Yuda
NIM : 03013682227001
Program Studi : Ilmu Teknik
Bidang Kajian Utama : Teknik Mesin
Judul : Pengerasan Permukaan Titanium Murni Grade 1
dengan Metode Powder Nitriding Berbahan Urea

Dengan ini saya menyatakan keaslian disertasi ini. Disertasi ini dibimbing oleh seorang Promotor dan dua orang Ko-Promotor dan tidak melibatkan plagiarisme. Jika ditemukan adanya plagiarisme dalam disertasi ini, saya bersedia menerima sanksi akademik apapun sesuai dengan regulasi yang telah ditetapkan Universitas Sriwijaya.

Palembang, Februari 2025



Aria Wira Yuda

NIM. 03013682227001

ABSTRAK

Titanium memiliki sifat-sifat yang unggul karena memiliki kekuatan tarik yang setara dengan kekuatan di sebagian besar baja paduan. Kepadatan titanium hanya 56 persen dari baja sehingga lebih ringan dan ketahanan korosinya sebanding dengan platinum serta dari semua unsur di kerak bumi, titanium adalah yang kesembilan paling banyak. Saat ini, kebutuhan titanium di area produk konsumen tumbuh sangat cepat. Namun, salah satu kelemahan utama paduan berbasis Titanium adalah memiliki kecenderungan untuk aus saat bersentuhan dengan material lain di bawah beban, yang menyebabkan ketahanan aus abrasif yang buruk. Oleh karena itu berbagai upaya dilakukan dalam bidang penelitian rekayasa permukaan untuk mendapatkan lapisan pelindung yang tahan lama dan memperluas jangkauan potensi aplikasi selain menjadi material konstruksi.

Riset ini meneliti proses nitridasi menggunakan urea bubuk pada material titanium murni, yang akan meningkatkan ketahanan aus dan kekerasan dengan membentuk nitrida di permukaan yang menghasilkan permukaan yang keras. Namun, karena sifatnya yang getas dan tipis lapisan nitrida di permukaan menjadi tidak diharapkan. Riset ini diharapkan mampu membentuk larutan padat Ti(N) satu fasa yang memiliki sifat kisi yang sama dengan substrat. Dengan mengendalikan tekanan nitrogen, suhu perlakuan panas, dan waktu perlakuan panas untuk membentuk profil difusi yang diinginkan tanpa terjadi penumpukan senyawa nitrida permukaan yang getas (*brittle*).

Nitriding dapat secara efektif meningkatkan kekerasan Titanium (Ti) Gr. 1 dalam kondisi non-vakum. Titanium (Ti) Gr. 1 yang dinitridasi pada suhu nitridasi 550°C selama 2 jam dan massa urea 150 gram menunjukkan kekerasan yang paling baik dan memiliki ketebalan lapisan yang merata yaitu 380 µm. Fase baru yang dihasilkan, khususnya TiN, telah diidentifikasi menggunakan pemeriksaan XRD.

Kata kunci: *Pengerasan Titanium, Nitriding, Titanium nitriding, urea.*

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
SURAT PERNYATAAN	iv
ABSTRAK	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	viii
KATA PENGANTAR	ix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Titanium	4
2.1.1 Pemrosesan Titanium	4
2.1.1.1 Electron beam cold hearth melting	5
2.1.1.2 Vacuum Arc Remelting (VAR)	7
2.1.2 Paduan Titanium	8
2.1.2.1 Fase Alpha (α)	10
2.1.2.2 Fase Beta (β)	10
2.1.2.3 Fase Dual Alpha + Beta ($\alpha + \beta$)	11
2.2 Metode Pengerasan Permukaan	12
2.2.1 Pengertian Kekerasan	17
2.2.2 Metode Pengujian Kekerasan	17
2.2.3 Laser nitriding	20
2.2.4 Plasma nitriding	22

2.2.5 Gas nitriding	24
2.2.4 Pack nitriding	26
2.3 Perbandingan Efisiensi dan Efektivitas Powder Nitriding Urea dengan Metode Nitridasi Lain	29
2.4 Perbandingan Hasil dari penelitian yang menggunakan plasma, gas dan powder nitriding.	31
2.3 Penyerapan Nitrogen pada permukaan logam	28
2.4 Interaksi Nitrogen dengan Titanium	30
2.5 Difusi pada Titanium	34
2.6 Dekomposisi Urea	35
2.7 State of the Art	38
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	44
3.1 Pertanyaan Penelitian (<i>Research Question</i>)	44
3.2 Rancangan Penelitian	44
3.3 Persiapan Eksperimen	51
3.3.1 Persiapan Material	51
3.3.1.1 Pelat Titanium Grade 1	51
3.3.1.2 Urea	52
3.3.2 Desain dan Fabrikasi Alat Nitridasi	53
3.4 Prosedur Proses Nitridasi	57
3.5 Metode Karakterisasi	62
3.5.1 <i>Scanning electron microscopy</i> (SEM) dan <i>energy dispersive spectroscopy</i> (EDS)	62
3.5.2 <i>X-Ray Diffraction Analysis</i> (XRD)	63
3.5.3 Pemeriksaan Profil Permukaan	64
3.6 Pengujian Mekanis	64
3.6.1 Uji Kekerasan	64
BAB 4 HASIL DAN ANALISIS	66
4.1 Nitridasi Titanium Murni Grade 1 Komersial (CP-Ti)	66
4.2 Lapisan Nitridasi yang terbentuk	67
4.3 Pengaruh Parameter Proses pada Difusi Nitrogen	72
4.4 Pengaruh Nitridasi pada oksidasi	73

4.5 Pengaruh Nitridasi pada Profil Permukaan	74
4.6 Pengaruh Suhu terhadap Kekerasan	76
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	79
5.1 Kesimpulan	79
5.2 Saran	79
LUARAN PUBLIKASI	
DAFTAR PUSTAKA	

DAFTAR GAMBAR

		Halaman
Gambar 2.1	Proses pembuatan paduan titanium dari bijih.	5
Gambar 2.2	Skema yang menunjukkan keseluruhan proses peleburan perapian dingin berkas elektron	6
Gambar 2.3	Skema yang menunjukkan proses <i>vacuum arc re-melting</i>	8
Gambar 2.4	Representasi 3D dari sel unit untuk a) hexagonal close-packed (HCP) a dan b) body-centered cubic (BCC) fase β paduan titanium, menunjukkan susunan atomnya	10
Gambar 2.5	Metode pengerasan permukaan untuk titanium dan paduannya	14
Gambar 2.6	Metode Brinell	18
Gambar 2.7	Metode Vickers	19
Gambar 2.8	Metode Rockwell	20
Gambar 2.9	Skematik <i>laser nitriding</i>	22
Gambar 2.10	Ilustrasi Skema Plasma Nitriding	24
Gambar 2.11	Ilustrasi Skema Gas Nitriding	26
Gambar 2.12	Ilustrasi Skema <i>Pack Nitriding</i>	28
Gambar 2.13	Keadaan molekuler untuk N ₂ pada Fe.	29
Gambar 2.14	Atom nitrogen pada sisi membran	30
Gambar 2.15	Skematik pembentukan dan pertumbuhan lapisan nitridasi	31
Gambar 2.16	Diagram Fase Ti-N	32
Gambar 2.17	Ketebalan lapisan nitridasi Titanium Grade 3 vs. perlakuan suhu dan waktu	34
Gambar 2.18	Skematik sistem eksperimen dekomposisi urea	35
Gambar 2.19	Empat tahap dekomposisi urea dengan pemanasan	36
Gambar 2.20	Skema reaksi dekomposisi urea	37
Gambar 2.21	Diagram Alur PRISMA untuk SLR (<i>Systematic Literature Review</i>)	40

Gambar 3.1	Sampel diproduksi menggunakan parameter proses dengan suhu konstan.	49
Gambar 3.2	diproduksi menggunakan parameter proses dengan massa urea konstan	49
Gambar 3.3	Diagram Alir Penelitian	50
Gambar 3.4	Ukuran Spesimen (satuan dalam milimeter)	51
Gambar 3.5	Penimbangan Urea	52
Gambar 3.6	Desain Alat Nitridasi	53
Gambar 3.7	Geometri Alat Nitridasi	54
Gambar 3.8	Fabrikasi alat nitridasi	56
Gambar 3.9	Penyetelan alat nitridasi	57
Gambar 3.10	Pemasangan <i>Heater</i> pada Alat Nitridasi	58
Gambar 3.11	Penyetelan Mesin Pemanas dan Elemen Heater	58
Gambar 3.12	Pemasangan Isolasi pada alat Nitridasi	59
Gambar 3.13	Pemanasan Urea (tanpa spesimen) pada alat Nitridasi	59
Gambar 3.14	Spesimen Uji didalam Alat Nitridasi	60
Gambar 3.15	Pengencangan baut flange	60
Gambar 3.16	Proses Nitridasi	61
Gambar 3.17	Kondisi Spesimen saat <i>Top Cover</i> dibuka	61
Gambar 3.18	Kondisi Spesimen setelah dikeluarkan dari alat nitridasi	61
Gambar 3.19	Thermo Scientific Axia ChemiSEM	63
Gambar 3.20	XRD Rigaku MiniFlex 300/600	63
Gambar 3.21	Mikroskop metalurgi Olympus BX51M	64
Gambar 3.22	Alat Uji Kekerasan SONOHARD SH-21A	65
Gambar 4.1	SEM dari penampang spesimen (a) dinitridasi pada suhu 500°C (b) dinitridasi pada suhu 550°C. Anak panah menunjukkan lapisan titanium nitrida.	68
Gambar 4.2	Spektrum EDS dari sampel nitridasi	69
Gambar 4.3	SEM dari penampang spesimen dinitridasi pada suhu 575oC	70
Gambar 4.4	Pembacaan Pressure Gauge (PG)	71

Gambar 4.5	X-ray Diffraction yang diambil dari permukaan lapisan nitridasi dihasilkan pada suhu 500°C, waktu perlakuan selama 2 jam	72
Gambar 4.6	Perubahan warna akibat oksidasi, (a) Sebelum Nitridasi, (b) Setelah Nitridasi	73
Gambar 4.7	Observasi menggunakan mikroskop, (a) Tanpa Nitridasi, (b) Dengan Nitridasi	74
Gambar 4.8	SEM dari profil permukaan spesimen (a) dinitridasi pada suhu 500°C, (b) dinitridasi pada suhu 550°C.	75
Gambar 4.9	Pengukuran uji kekerasan pada 6 sampel	77

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Daftar Titanium Paduan	10
Table 2.2 Beberapa paduan titanium komersial terpenting di masing-masing dari ketiga kelompok paduan α , β , dan $\alpha + \beta$	13
Tabel 2.3 Perbandingan Biaya	30
Tabel 2.4 Efisiensi Energi	30
Tabel 2.5 Dampak Lingkungan	31
Tabel 2.6 Kekerasan Permukaan	31
Tabel 2.7 Kedalaman Difusi	32
Table 2.8 Beberapa penelitian mengenai nitridasi titanium	45
Tabel 3.1 Sampel diproduksi menggunakan parameter proses dengan suhu konstan	49
Tabel 3.2 Sampel diproduksi menggunakan parameter proses dengan massa urea konstan	49
Tabel 3.3 Komposisi Titanium Grade 1 (%.wt)	51
Tabel 3.4 Properti Urea	52
Tabel 3.5 Komponen alat nitridasi	53
Tabel 4.1 Hasil pemeriksaan EDS	69

DAFTAR SINGKATAN

ASTM	American Society for Testing and Materials
CP-Ti	Commercially Pure Titanium
EDAX	Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy
EDS	Energy-dispersive X-ray Spectroscopy
HCP	Hexagonal Closed Packed
ISO	International Organization for Standardization
PVD	Physical Vapor Deposition
SLR	Systematic Literature Review
SEM	Scanning Electron Microscopy
XRD	X-ray Diffraction

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, atas limpahan rahmat dan hidayahNya dalam penyelesaian Disertasi dengan judul “**Pengerasan Permukaan Titanium Murni Grade 1 dengan Metode *Powder* Nitriding Berbahan Urea**”. Penelitian ini disusun dalam rangka penyusunan disertasi yang menjadi salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Doktor Ilmu Teknik dari Program Pascasarjana Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.

Dengan tersusunnya penelitian ini, penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada **Prof. Ir. Amir Arifin, S.T., M.Eng., Ph.D.** selaku Promotor dan **Ir. Irsyadi Yani, S.T., M.Eng., Ph.D.** dan **Ir. Barlin, S.T., M.Eng., Ph.D.** selaku Ko-Promotor yang telah berkenan memberi bimbingan, arahan dan masukan bagi tersusunnya penelitian yang layak untuk disajikan. Penulis juga mengucapkan terima kasih dan penghargaan kepada:

1. Keluarga yang telah mendoakan dan memberikan dukungan dalam proses perkuliahan dan penyelesaian disertasi ini.
2. Rektor Universitas Sriwijaya, Prof. Dr. Taufiq Marwa, S.E., M.Si
3. Ketua Program Studi Doktor Ilmu Teknik Universitas Sriwijaya, Prof. Dr. Ir. Nukman, M.T.
4. Bapak/Ibu Dosen Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya, khususnya Program Studi Teknik Mesin.
5. Manajemen dan rekan kerja PT. Pusri Palembang yang telah membantu kegiatan penelitian hingga tersusunnya disertasi ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan penelitian ini masih terdapat kelemahan yang perlu diperkuat dan kekurangan yang perlu dilengkapi. Semoga penelitian ini dapat memberikan manfaat untuk kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi serta menjadi referensi bagi yang akan mengkaji dimasa yang akan datang.

Palembang, Februari 2025

Aria Wira Yuda

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Titanium pertama kali diidentifikasi sebagai unsur logam oleh Gregor di Inggris pada tahun 1791. Pada tahun 1795, Klaproth, seorang ahli kimia Jerman, menemukan kembali logam ini dan menamainya titanium, sesuai nama dewa Titan, dalam mitologi Yunani (1). Unsur Ti adalah logam paling melimpah keempat di kerak bumi. Karena afinitasnya yang besar terhadap oksigen dan nitrogen, titanium murni belum diproduksi dalam proses komersial hingga akhir tahun 1930-an. Dalam dekade berikutnya, penelitian dan aplikasi titanium mengalami perkembangan yang luar biasa. Produksi titanium sudah mencapai lebih dari 100.000 ton per tahun pada awal 1980-an, dan masih terus meningkat (2).

Dari sekitar tahun 1950, pengembangan paduan titanium berkembang pesat karena pengenalan penambahan aluminium untuk tujuan penguatan. Beberapa elemen paduan lain yang dikombinasikan dengan aluminium telah dicoba, seperti Ti-5Al-2.5Sn untuk aplikasi suhu tinggi, dan Ti-7Al-4Mo untuk aplikasi kekuatan tinggi. Munculnya paduan Ti-6Al-4V, yang memadukan sifat-sifat unggul dan kemampuan produksi yang baik, merupakan terobosan besar. Saat ini, Ti-6Al-4V masih merupakan paduan titanium yang paling banyak digunakan.

Paduan titanium memiliki kombinasi unik dari sifat mekanik yang baik, kepadatan rendah, ketahanan korosi dan biokompatibilitas, yang menjadikannya kandidat yang menarik untuk aplikasi struktural dan biomedis. Dua area aplikasi klasik adalah badan pesawat dan mesin pesawat yang digerakkan oleh efisiensi struktur paduan titanium yang unggul (3). Di bidang industri kimia dan listrik tradisional, menggunakan paduan titanium sebagai bahan tahan korosi telah menjadi lebih umum dalam beberapa tahun terakhir (4)(5). Area titanium yang mapan adalah bidang biomedis (6). Beberapa paduan telah digunakan sebagai bahan implan (7)(8). Upaya telah dilakukan untuk mengembangkan paduan baru untuk meningkatkan kekuatan kelelahan dan biokompatibilitas (9)(10). Kebutuhan titanium di area produk konsumen tumbuh sangat cepat.

Namun, salah satu kelemahan utama paduan berbasis Titanium dan Titanium adalah memiliki kecenderungan untuk aus saat bersentuhan dengan material lain di bawah beban, yang menyebabkan ketahanan aus abrasif yang buruk (11). Oleh karena itu berbagai upaya dilakukan dalam bidang penelitian rekayasa permukaan untuk mendapatkan lapisan pelindung yang tahan lama dan memperluas jangkauan potensi aplikasi selain menjadi material konstruksi.

Prosedur yang sederhana, murah, relatif ramah lingkungan dan aman, menjanjikan aplikasi yang lebih luas dan skalabilitas. Dalam penelitian ini, kami menyajikan cara mudah untuk menghasilkan struktur nano logam nitrida dan karbida dengan cara yang lebih sederhana. Sebagai sumber nitrogen/karbon yang tidak beracun, urea, dan beberapa turunan dari senyawa ini dipilih, yang secara bersamaan berperan sebagai pelarut perantara dan zat penstabil pada fase awal reaksi pembentukan partikel. Dalam percobaan sebelumnya, urea telah digunakan secara eksklusif sebagai sumber nitrogen untuk mengatasi sintesis logam nitrida (12) (13).

1.2 Rumusan Masalah

Konsentrasi nitrogen yang meningkat akan membentuk lapisan Ti_2N di permukaan titanium, sehingga menghalangi difusi nitrogen ke dalam titanium untuk membentuk substrat $\alpha-Ti$. Lapisan Ti_2N yang terlalu tebal di permukaan akan meningkatkan ketahanan aus dan kekerasan namun lapisan ini getas dan mudah retak sehingga menimbulkan *initial crack* dan menurunkan ketahanan lelah (*fatigue*). Penelitian ini fokus mengenai mekanisme pembentukan lapisan Ti_2N dan melakukan riset eksperimen untuk mengatasi masalah pembentukan lapisan Ti_2N yang terlalu cepat.

Peningkatan sifat kekerasan dan sifat mekanis lainnya dari Titanium dipengaruhi oleh mekanisme difusi nitrogen ke dalam substrat titanium. Dengan demikian penelitian mengenai mekanisme ini diperlukan untuk mengetahui variabel-variabel yang berpengaruh terhadap difusi nitrogen serta efeknya pada sifat mekanis Titanium murni.

Plasma nitriding adalah pilihan terbaik untuk dampak lingkungan minimal, tetapi memiliki biaya tinggi. Gas nitriding lebih stabil tetapi mahal dan memiliki dampak lingkungan lebih besar. Powder nitriding urea adalah metode paling hemat

biaya, memiliki efisiensi energi yang baik, dan lebih ramah lingkungan dibanding gas dan plasma nitriding. Metode nitriding pernah dilakukan pada besi cor (FCD 700) dengan media nitridasi urea mendapatkan pengaruh temperatur dan waktu proses nitridasi terhadap kekerasan permukaan (14).

Metode nitridasi titanium menggunakan urea merupakan teknik baru yang diinvestigasi untuk membentuk profil konsentrasi nitrogen yang diharapkan dipermukaan titanium dan didalam substrat titanium guna meningkatkan kekerasan dan sifat lelah (*fatigue properties*) dari titanium Gr. 1.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini berfokus pada upaya untuk menemukan proses nitridasi yang akan meningkatkan ketahanan aus dan korosi dengan membentuk larutan padat Ti(N) satu fasa, yang memiliki sifat kisi yang sama dengan substrat. Sifat permukaan titanium dan paduannya dapat ditingkatkan secara dramatis dengan menerapkan proses serupa menggunakan nitrogen sebagai pelarut interstitial. Hasil percobaan menunjukkan bahwa proses ini memang meningkatkan kekerasan permukaan dan ketahanan aus. diharapkan proses nitridasi akan meningkatkan sifat mekanik titanium.

Secara rinci penelitian ini bertujuan untuk:

1. Teknik nitridasi baru diperkenalkan dan diselidiki untuk membentuk profil konsentrasi nitrogen yang diinginkan pada lapisan permukaan titanium.
2. Menyelidiki larutan padat Ti(N) satu fasa yang terbentuk
3. menganalisis lapisan nitrida yang terbentuk dengan substrat
4. menganalisis dampak kenaikan suhu pada permukaan substrat
5. menganalisis dampak perlakuan pada sifat mekanik Titanium

1.4 Batasan Penelitian

Batasan pada penelitian ini adalah:

1. Penelitian berbahan Titanium murni grade 1 yang dikeraskan dengan metode Pack Nitriding
2. Nitrogen berasal dari pupuk urea (yang mengandung 46 persen Nitrogen)
3. Perlakuan panas menggunakan tungku (furnace)

1.5 Manfaat Penelitian

Perlakuan panas dan pengerasan permukaan adalah proses yang sering dilakukan di sektor Industri, dimana adanya peningkatan penggunaan komponen berbahan Titanium. Penelitian ini mempunyai manfaat yaitu:

1. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai rekomendasi metode baru untuk pengerasan Titanium menggunakan urea
2. Menghasilkan pengaruh karakteristik lapisan nitrida oleh Nitrogen pada sifat mekanis Titanium.

DAFTAR PUSTAKA

1. Lide DR. CRC handbook of chemistry and physics. Vol. 85. CRC press; 2004.
2. Froes FH, Eylon D, Bomberger HB. Titanium technology: present status and future trends. Titan Dev Assoc 1985,. 1985;191.
3. Boyer RR. New titanium applications on the Boeing 777 airplane. Jom. 1992;44(5):23–5.
4. Chirico C, Romero AV, Gordo E, Tsipas SA. Improvement of wear resistance of low-cost powder metallurgy β -titanium alloys for biomedical applications. Surf Coatings Technol. 2022;434:128207.
5. Yang C, Liu W, Yang X, Meng Z, Hong L. Preparation of TiN compound layer by intermittent vacuum diffusion nitriding on Ti6Al4V titanium alloy. Vacuum. 2024;113531.
6. Hussein EY, Al-Murshdy JMS, Radhi NS, Al-Khafaji Z. Surface Modification of Titanium Alloy by Titania/Silver Multilayers Coating for Biomedical Application. J Adv Res Micro Nano Eng. 2024;20(1):66–78.
7. Bedouin Y, Gordin D, Pellen-Mussi P, Pérez F, Tricot-Doleux S, Vasilescu C, et al. Enhancement of the biocompatibility by surface nitriding of a low-modulus titanium alloy for dental implant applications. J Biomed Mater Res Part B Appl Biomater. 2019;107(5):1483–90.
8. Chan C-W, Lee S, Smith GC, Donaghy C. Fibre laser nitriding of titanium and its alloy in open atmosphere for orthopaedic implant applications: Investigations on surface quality, microstructure and tribological properties. Surf Coatings Technol [Internet]. 2017;309:628–40.
9. Zeng C, Wen H, Ettefagh AH, Zhang B, Gao J, Haghshenas A, et al. Laser nitriding of titanium surfaces for biomedical applications. Surf Coatings Technol. 2020;385:125397.
10. Kurup A, Dhattrak P, Khasnis N. Surface modification techniques of titanium and titanium alloys for biomedical dental applications: A review. Mater Today Proc. 2021;39:84–90.
11. Kang J, Wang M, Yue W, Fu Z, Zhu L, She D, et al. Tribological behavior of titanium alloy treated by nitriding and surface texturing composite technology. Materials (Basel). 2019;12(2):301.
12. Yumusak G, Leyland A, Matthews A. The effect of pre-deposited titanium-

based PVD metallic thin films on the nitrogen diffusion efficiency and wear behaviour of nitrated Ti alloys. *Surf Coatings Technol.* 2020;394:125545.

13. Szymkiewicz K, Morgiel J, Maj Ł, Pomorska M, Tarnowski M, Tkachuk O, et al. Effect of nitrating conditions of Ti6Al7Nb on microstructure of TiN surface layer. *J Alloys Compd.* 2020;845:156320.
14. Setiawan AB, Purwadi W. Pengaruh Temperatur Dan Waktu Proses Nitridasi Terhadap Kekerasan Permukaan FCD 700 Dengan Media Nitridasi Urea. In: *Seminar Nasional Kluster Riset Teknik Mesin.* 2009. p. 35–40.
15. El Khalloufi M, Drevelle O, Soucy G. Titanium: An overview of resources and production methods. *Minerals.* 2021;11(12):1425.
16. Jaffee RI. The physical metallurgy of titanium alloys. *Prog Met Phys.* 1958;7:65–163.
17. Kamat AM, Copley SM, Todd JA. A two-step laser-sustained plasma nitriding process for deep-case hardening of commercially pure titanium. *Surf Coatings Technol* [Internet]. 2017;313:82–95.
18. Poulsen E. Safety-related problems in the titanium industry in the last 50 years. *JOM.* 2000;52(5):13–7.
19. Kroll W. The production of ductile titanium. *Trans Electrochem Soc.* 1940;78(1):35.
20. Tyunkov A V, Golosov DA, Zolotukhin DB, Nikonenko A V, Oks EM, Yushkov YG, et al. Nitriding of titanium in electron beam excited plasma in medium vacuum. *Surf Coatings Technol* [Internet]. 2020;383:125241. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897219312319>
21. Ohtsu N, Endo R, Takeda S, Miura K, Kobayashi K. An open-atmosphere nitriding process for titanium using a watt-level pulsed Nd:YAG laser. *Surf Coatings Technol* [Internet]. 2022;438:128362.
22. Powell IV AC. *Transport phenomena in electron beam melting and evaporation.* Massachusetts Institute of Technology; 1997.
23. Rie K-T, Lampe T. Thermochemical surface treatment of titanium and titanium alloy Ti 6Al 4V by low energy nitrogen ion bombardment. *Mater Sci Eng.* 1985;69(2):473–81.
24. Akram M, Jansen KMB, Ernst LJ, Bhowmik S. Atmospheric pressure plasma surface modification of titanium for high temperature adhesive

- bonding. *Int J Adhes Adhes - INT J ADHES ADHES*. 2011 Oct 1;31:598–604.
25. Kikuchi S, Yoshida S, Ueno A. Improvement of fatigue properties of Ti-6Al-4V alloy under four-point bending by low temperature nitriding. *Int J Fatigue*. 2019;120:134–40.
 26. Foltz JW, Welk B, Collins PC, Fraser HL, Williams JC. Formation of grain boundary α in β Ti alloys: its role in deformation and fracture behavior of these alloys. *Metall Mater Trans A*. 2011;42:645–50.
 27. Boyer, Collings WG. *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*. ASM International; 1994.
 28. Gautier K, Monceau D, Epifano E, Connétable D, Gheno T. Study of the Role of Nitrogen in the Oxidation of Titanium-Based Alloys by Changing the Reaction Gas. *High Temp Corros Mater*. 2024;1–12.
 29. Jeong H-G, Lee Y, Lee D-G. Effects of pre-heat conditions on diffusion hardening of pure titanium by vacuum rapid nitriding. *Surf Coatings Technol [Internet]*. 2017;326:395–401.
 30. Yulin L, Qingjun Z, Mingliang L. Effect of novel surface treatment on corrosion behavior and mechanical properties of a titanium alloy. *Baosteel Tech Res*. 2021;15(2):11–9.
 31. Luk'yanenko AG, Pohrelyuk IM, Fedirko VM, Molyar AG, Trush V, Kravchyshyn TM. Gas Nitriding of the Near-Beta-titanium alloy. *Arch Metall Mater*. 2023;68.
 32. Shen H, Wang L. Formation, tribological and corrosion properties of thicker Ti-N layer produced by plasma nitriding of titanium in a N₂-NH₃ mixture gas. *Surf Coatings Technol*. 2020;393:125846.
 33. Drouet M, Pichon L, Vallet Y, Le Bourhis E, Christiansen TL. Surface engineering of titanium alloy TiAl6V4 by multi-interstitial diffusion using plasma processing. *Eur J Mater*. 2022;2(1):1–11.
 34. Rochana P, Lee K, Wilcox J. Nitrogen adsorption, dissociation, and subsurface diffusion on the vanadium (110) surface: A DFT study for the nitrogen-selective catalytic membrane application. *J Phys Chem C*. 2014;118(8):4238–49.
 35. Mortensen JJ, Hansen LB, Hammer B, Nørskov JK. Nitrogen Adsorption and Dissociation on Fe(111). *J Catal [Internet]*. 1999;182(2):479–88. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021951798923648>

36. Zeng C, Wen H, Zhang B, Sprunger PT, Guo SM. Diffusion of oxygen and nitrogen into titanium under laser irradiation in air. *Appl Surf Sci* [Internet]. 2020;505:144578.
37. Xu J, Lane CD, Ou J, Cockcroft SL, Maijer DM, Akhtar A, et al. Diffusion of nitrogen in solid titanium at elevated temperature and the influence on the microstructure. *J Mater Res Technol* [Internet]. 2021;12:125–37.
38. Akgun O V, Inal OT. Laser surface modification of Ti-6Al-4V alloy. *J Mater Sci*. 1994;29:1159–68.
39. Khaled M, Yilbas BS, Shirokoff J. Electrochemical study of laser nitrided and PVD TiN coated Ti-6Al-4V alloy: the observation of selective dissolution. *Surf Coatings Technol*. 2001;148(1):46–54.
40. Alonso F, Rinner M, Loinaz A, Onate JI, Ensinger W, Rauschenbach B. Characterization of Ti-6Al-4V modified by nitrogen plasma immersion ion implantation. *Surf Coatings Technol*. 1997;93(2–3):305–8.
41. H.-J. S, Reinhold B, Wilsdorf K. Gas nitriding–process control and nitriding non-ferrous alloys. *Surf Eng*. 2001;17(1):41–54.
42. Huang H-H, Hsu C-H, Pan S-J, He J-L, Chen C-C, Lee T-L. Corrosion and cell adhesion behavior of TiN-coated and ion-nitrided titanium for dental applications. *Appl Surf Sci*. 2005;244(1–4):252–6.
43. Kamat A, Copley S, Segall A, Todd J. Laser-Sustained Plasma (LSP) Nitriding of Titanium: A Review. *Coatings*. 2019 Apr 26;9:283.
44. Xie F, Zhang G, Pan J. Characterizing AISI 1045 steel surface duplex-treated by alternating current field enhanced pack aluminizing and nitriding. *Appl Surf Sci*. 2018;431:44–7.
45. Rashid RAR, Palanisamy S, Attar H, Bermingham M, Dargusch MS. Metallurgical features of direct laser-deposited Ti6Al4V with trace boron. *J Manuf Process*. 2018;35:651–6.
46. Sarma B, Ravi Chandran KS. Recent advances in surface hardening of titanium. *Jom*. 2011;63:85–92.
47. Zheng X, Zheng K, Jia W, Qu S, Yu S, Zhou B, et al. Plasma surface alloyed Ta diffusion layer and Ta coating on Ti6Al4V alloy: Mechanical and wear properties. *J Appl Phys*. 2024;136(2).
48. Wilson AD, Leyland A, Matthews A. A comparative study of the influence of plasma treatments, PVD coatings and ion implantation on the tribological performance of Ti-6Al-4V. *Surf coatings Technol*. 1999;114(1):70–80.

49. Budinski KG. Surface Engineering for Wear Resistance.(Retroactive Coverage). Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, United States, 1988 420. 1988;
50. Raveh A. Mechanisms of rf plasma nitriding of Ti-6Al-4V alloy. Mater Sci Eng A. 1993;167(1–2):155–64.
51. Zhecheva A, Sha W, Malinov S, Long A. Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods. Surf Coatings Technol. 2005;200(7):2192–207.
52. Bell T, Bergmann HW, Lanagan J, Morton PH, Staines AM. Surface engineering of titanium with nitrogen. Surf Eng. 1986;2(2):133–43.
53. Deepak JR, Joy N, Krishnamoorthy A, Jaswanth CP, Harish G. Gas nitriding of CP grade – 2 commercially pure titanium and Ti6Al4V grade – 5 titanium alloy. Mater Today Proc. 2021;44:3744–50.
54. Conrad H. Effect of interstitial solutes on the strength and ductility of titanium. Prog Mater Sci. 1981;26(2–4):123–403.
55. Liu J, Wang X, Hu Y, Luo L, Jiang C, Liu F, et al. Effect of hydrogen on microstructure and mechanical properties of plasma-nitrided pure titanium by cathodic cage plasma nitriding. Surf Coatings Technol [Internet]. 2023;456:129231. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897223000063>
56. Zhecheva A, Malinov S, Sha W. Microstructure and microhardness of gas nitrided surface layers in Ti–8Al–1Mo–1V and Ti–10V–2Fe–3Al alloys. Surf Eng. 2005;21(4):269–78.
57. Guo J, Shi Y, Li C, Zhang G. Investigation of nitrogen ionization state and its effect on the nitride layer during fiber laser gas nitriding of Ti-6Al-4V alloy. Surf Coatings Technol [Internet]. 2021;418:127254.
58. Jiang X, Dai Y, Xiang Q, Liu J, Yang F, Zhang D. Microstructure and wear behavior of inductive nitriding layer in Ti–25Nb–3Zr–2Sn–3Mo alloys. Surf Coatings Technol [Internet]. 2021;427:127835.
59. Parry V, Le Bourhis E, Pichon L, Drouet M. Relation between Mechanical Hardening and Nitrogen Profile of PBII Nitrided Titanium Alloy. Materials (Basel). 2022;15(24):9028.
60. Yan X, Yin S, Chen C, Huang C, Bolot R, Lupoi R, et al. Effect of heat treatment on the phase transformation and mechanical properties of Ti6Al4V fabricated by selective laser melting. J Alloys Compd. 2018;764:1056–71.

61. de Castro MCB, Couto AA, Almeida GFC, Massi M, de Lima NB, da Silva Sobrinho A, et al. The effect of plasma nitriding on the fatigue behavior of the Ti-6Al-4V alloy. *Materials (Basel)*. 2019;12(3):520.
62. Li G, Yao X, Wood RJ, Guo J, Shi Y. Laser surface nitriding of Ti-6Al-4V alloy in nitrogen-argon atmospheres. *Coatings*. 2020;10(10):1009.
63. Pohrelyuk IM, Lavrys SM, Sakharuk OM, Stasyshyn I V, Penkovyi O V. Pretreatment influence on titanium surface properties after gas nitriding. *J Mater Eng Perform*. 2017;26:5072-8.
64. Takesue S, Kikuchi S, Akebono H, Komotori J, Fukazawa K, Misaka Y. Effects of gas blow velocity on the surface properties of Ti-6Al-4V alloy treated by gas blow IH nitriding. *Mater Trans*. 2017;58(8):1155-60.
65. She D, Yue W, Fu Z, Wang C, Yang X, Liu J. Effects of nitriding temperature on microstructures and vacuum tribological properties of plasma-nitrided titanium. *Surf Coatings Technol*. 2015;264:32-40.
66. Bhadeshia H, Honeycombe R. Chapter 8 - Heat Treatment of Steels: Hardenability. In: Bhadeshia H, Honeycombe RBT-SM and P (Fourth E, editors. *Butterworth-Heinemann*; 2017. p. 217-36.
67. Martin JW. *Precipitation hardening: theory and applications*. Butterworth-Heinemann; 2012.
68. Masse J-E, Mathieu J-F. Laser surface nitriding of Ti-6Al-4V titanium alloy. *Mater Manuf Process*. 1996;11(2):207-14.
69. Ignatiev M, Kovalev E, Melekhin I, Smurov IY, Sturlese S. Investigation of the hardening of a titanium alloy by laser nitriding. *Wear*. 1993;166(2):233-6.
70. Weng F, Chen C, Yu H. Research status of laser cladding on titanium and its alloys: A review. *Mater Des*. 2014;58:412-25.
71. Wriedt HA, Murray JL. The N-Ti (nitrogen-titanium) system. *Bull Alloy Phase Diagrams*. 1987;8:378-88.
72. Semiatin SL, Ivanchenko VG, Ivasishin OM. Diffusion models for evaporation losses during electron-beam melting of alpha/beta-titanium alloys. *Metall Mater Trans B*. 2004;35:235-45.
73. Man HC, Bai M, Cheng FT. Laser diffusion nitriding of Ti-6Al-4V for improving hardness and wear resistance. *Appl Surf Sci*. 2011;258(1):436-41.
74. Meletis EI. Intensified plasma-assisted processing: science and

- engineering. *Surf Coatings Technol.* 2002;149(2–3):95–113.
75. Zhecheva A, Malinov S, Sha W. Surface gas nitriding of Ti-6Al-4V and Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.08 Si alloys. *Int J Mater Res.* 2022;94(1):19–24.
 76. Schutz RW, Watkins HB. Recent developments in titanium alloy application in the energy industry. *Mater Sci Eng A.* 1998;243(1–2):305–15.
 77. El-Hossary F, Negm NZ, Khalil SM, Raaif M. Surface modification of titanium by radio frequency plasma nitriding. *Thin Solid Films.* 2006 Feb 1;497:196–202.
 78. Han A, Li X, Huang B, Tsoi J, Matinlinna J, Chen Z, et al. The effect of titanium implant surface modification on the dynamic process of initial microbial adhesion and biofilm formation. *Int J Adhes Adhes.* 2016 Mar 1;69.
 79. Wang Dajian. Effects of alloying elements on nitrogen diffusion behavior around TiN/Ti interface α region in as-cast titanium alloys.. 2001;(5):738–42.
 80. Mortensen JJ, Ganduglia-Pirovano M V, Hansen LB, Hammer B, Stoltze P, Nørskov JK. Nitrogen adsorption on Fe (111),(100), and (110) surfaces. *Surf Sci.* 1999;422(1–3):8–16.
 81. Hacısalıhoğlu İ, Kaya G, Ergüder TO, Mandev E, Manay E, Yıldız F. Tribological and thermal properties of plasma nitrided Ti45Nb alloy. *Surfaces and Interfaces [Internet].* 2021;22:100893.
 82. Bars J-P, David D, Etchessahar E, Debuigne J. Titanium α -nitrogen solid solution formed by high temperature nitriding: diffusion of nitrogen, hardness, and crystallographic parameters. *Metall Trans A.* 1983;14:1537–43.
 83. Shih HD, Jona F, Jepsen DW, Marcus PM. Low-energy-electron-diffraction determination of the atomic Arrangement in a Monatomic Underlayer of Nitrogen on Ti (0001). *Phys Rev Lett.* 1976;36(14):798.
 84. Han S, Kim H, Lee Y, Lee J, Kim S-G. Plasma source ion implantation of nitrogen, carbon and oxygen into Ti-6Al-4V alloy. *Surf Coatings Technol.* 1996;82(3):270–6.
 85. Rie K-T, Menthe E, Matthews A, Legg K, Chin J. Plasma surface engineering of metals. *MRS Bull.* 1996;21(8):46–51.
 86. Attabi S, Mokhtari M, Taibi Y, Abdel-Rahman I, Hafez B, Elmsellem H. Electrochemical and tribological behavior of surface-treated titanium alloy

- Ti-6Al-4V. *J Bio-and Tribo-Corrosion*. 2019;5:1-11.
87. Hubbard P, Partridge JG, Doyle ED, McCulloch DG, Taylor MB, Doney SJ. Investigation of nitrogen mass transfer within an industrial plasma nitriding system I: The role of surface deposits. *Surf Coatings Technol*. 2010;204(8):1145-50.
 88. Frickel DP, Kuznetsov M V, Shalaeva E V. XPS and XPD analysis of nitrogen adsorption on the Ti (0001) surface. *Surf Rev Lett*. 1997;4(06):1309-14.
 89. Chen A, Blanchard J, Han SW, Conrad JR, Dodd RA, Fetherston P, et al. A Study of nitrogen ion-implanted ti-6ai-4v eli by plasma source ion implantation at high temperature. *J Mater Eng Perform*. 1992;1:845-7.
 90. Fedirko VM, Pogrelyuk IM. The temperature factor in nitriding titanium alloys in a low-density dynamic nitrogen atmosphere. *Sov Mater Sci a transl Fiz mekhanika Mater Sci Ukr SSR*. 1991;26:559-62.
 91. Maksimovich GG, Pogrelyuk IN, Fedirko VN. Structure formation in nitrided layers of titanium alloys. *Met Sci Heat Treat*. 1986;28(6):393-7.
 92. Ford WE, Jung A, Hirsch A, Graupner R, Scholz F, Yasuda A, et al. Urea-Melt Solubilization of Single-Walled Carbon Nanotubes. *Adv Mater*. 2006;18(9):1193-7.
 93. Kuntz C, Kuhn C, Weickenmeier H, Tischer S, Börnhorst M, Deutschmann O. Kinetic modeling and simulation of high-temperature by-product formation from urea decomposition. *Chem Eng Sci*. 2021;246:116876.
 94. Wang D, Dong N, Hui S, Niu Y. Analysis of urea pyrolysis in 132.5-190 C. *Fuel*. 2019;242:62-7.
 95. Tischer S, Börnhorst M, Amsler J, Schoch G, Deutschmann O. Thermodynamics and reaction mechanism of urea decomposition. *Phys Chem Chem Phys [Internet]*. 2019;21(30):16785-97.
 96. Eichelbaum M, Farrauto RJ, Castaldi MJ. Urea-SCR for NOx Diesel Emission Control: The influence of urea and its decomposition products on the SCR activity of zeolites. *Earth Environ Eng (HKSM), Columbia Univ New York, NY*. 2009;10027.
 97. Datta S, Das M, Balla VK, Bodhak S, Murugesan VK. Mechanical, wear, corrosion and biological properties of arc deposited titanium nitride coatings. *Surf Coatings Technol [Internet]*. 2018;344:214-22.
 98. Kaisar N, Huang Y-T, Jou S, Kuo H-F, Huang B-R, Chen C-C, et al. Surface-enhanced Raman scattering substrates of flat and wrinkly titanium

nitride thin films by sputter deposition. *Surf Coatings Technol* [Internet]. 2018;337:434–8. Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897218300562>

99. Mizukami H, Kitaura T, Shirai Y. Nitriding Behavior of Titanium Sponge Studied using Nitrogen Gas and Dissolution Behavior of a Titanium Nitride Sponge in Titanium Alloy Melt. *ISIJ Int.* 2019;59(1):104–12.
100. Zhao X, Wang B, Lai W, Zhang G, Zeng R, Li W, et al. Improved tribological properties, cyto-biocompatibility and anti-inflammatory ability of additive manufactured Ti-6Al-4V alloy through surface texturing and nitriding. *Surf Coatings Technol* [Internet]. 2021;425:127686.
101. Mohammadi M, Akbari A, Warchomicka F, Pichon L. Depth profiling characterization of the nitride layers on gas nitrided commercially pure titanium. *Mater Charact.* 2021;181:111453.
102. Xu S, Cao Y, Duan B, Liu H, Wang J, Si C. Enhanced strength and sliding wear properties of gas nitrided Ti-6Al-4V alloy by ultrasonic shot peening pretreatment. *Surf Coatings Technol* [Internet]. 2023;458:129325.
103. Kuntz C, Weickenmeier H, Börnhorst M, Deutschmann O. Deposition and decomposition of urea and its by-products on TiO₂ and VWT-SCR catalysts. *Int J Heat Fluid Flow* [Internet]. 2022;95:108969.
104. Callister Jr WD, Rethwisch DG. *Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach.* John Wiley & Sons; 2020.