



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH KANDUNGAN Mo DAN Nb DI DALAM PADUAN
LOGAM IMPLAN (Ti-Al-Mo DAN Ti-Al-Nb) TERHADAP
PEMBENTUKAN FASA BETA (β)**

SKRIPSI

FENDY ROKHMANTO

0706200106

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
DESEMBER 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH KANDUNGAN Mo DAN Nb DI DALAM PADUAN
LOGAM IMPLAN (Ti-Al-Mo DAN Ti-Al-Nb) TERHADAP
PEMBENTUKAN FASA BETA (β)**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana

FENDY ROKHMANTO

0706200106

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
DESEMBER 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Fendy Rokhmanto

NPM : 0706200106

Tanda Tangan :

Tanggal : 16 Desember 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Fendy Rokhmanto

NPM : 0706200106

Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material

Judul Skripsi : Pengaruh kandungan Mo dan Nb di dalam paduan logam implan
(Ti-Al-Mo dan Ti-Al-Nb) terhadap pembentukan fasa beta (β)

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Ir. Myrna Arianti, M.Sc (.....)

Pembimbing II : Ir. Yuswono, M.Eng (.....)

Penguji : Prof. Dr. Ir. Anne Zulfia, M.Sc (.....)

Penguji : Dwi Marta Nurjaya, ST., MT (.....)

Di tetapkan di : Depok

Tanggal : 28 Desember 2009

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan atas berkah dan rahmat Allah SWT, penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul Pengaruh kandungan Mo dan Nb di dalam paduan logam implan (Ti-Al-Mo dan Ti-Al-Nb) terhadap pembentukan fasa beta (β). Sholawat dan salam semoga tetap tercurahkan kepada Nabi besar Muhammad SAW, keleuarga, sahabat dan kepada kita semua hingga akhir zaman.

Semoga penelitian ini dapat bermanfaat bagi kehidupan manusia dan dapat diaplikasikan sesuai dengan arah penelitian ini yaitu menyiapkan material untuk kebutuhan bedah orthopedik sebagai material implan pengganti tulang rusak atau patah.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Prof . Dr .Ing Bambang Suharno selaku Kepala Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia
2. Ir. Eddy Dwi Tjahyono selaku Kepala Pusat Penelitian Metalurgi LIPI atas ijin dan dispensasi untuk melaksanakan tugas belajar
3. Ir. Myrna Arianti, M.Sc selaku pembimbing yang telah membimbing penulis dalam penyusunan laporan tugas akhir
4. Ir. Yuswono, M.Eng selaku pembimbing yang telah membimbing penulis dalam proses pengerjaan penelitian hingga penyusunan laporan tugas akhir
5. Segenap staff akademik dan non akademik Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia
6. Segenap karyawan dan karyawan Pusat Penelitian Metalurgi LIPI
7. Kedua orang tua bapak, ibu dan kakak tercinta di Magelang atas segala dukungannya, satu kata lagi maaf
8. Andrea Pitasari S.TP atas dukungan, semangat, motivasi dan doanya
9. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Metalurgi dan Material yang telah memberikan motivasi.

atas segala bantuan yang telah diberikan. Semoga mendapat balasan yang setimpal dari Allah S.W.T.

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Fendy Rokhmanto
NPM : 0706200106
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exsecutive royalty Free Right*)** atas karya ilmiah berjudul:

Pengaruh kandungan Mo dan Nb di dalam paduan logam implan (Ti-Al-Mo dan Ti-Al-Nb) terhadap pembentukan fasa beta (β)

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 16 Desember 2009

Yang menyatakan

(Fendy Rokhmanto)

ABSTRAK

Nama : Fendy Rokhmanto
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengaruh kandungan Mo dan Nb di dalam paduan logam implan (Ti-Al-Mo dan Ti-Al-Nb) terhadap pembentukan fasa beta (β)

Ada tiga jenis logam paduan yang bersifat biokompatibel yaitu *stainless steel free Ni*, paduan Co-Cr dan paduan Ti. Paduan Ti yang sudah ada dan difungsikan sebagai kompoen adalah Ti-Al-V. Kandungan unsur Al untuk meningkatkan kekuatan dan sebagai pembentuk fasa alfa dan kandungan unsur V mempunyai fungsi yang sama dan sebagai pembentuk fasa beta. Paduan Ti-Al-V tidak bersifat biokompatibel karena adanya kandungan unsur V sebagai penyebab alergi terhadap tubuh. Dalam penelitian ini dilakukan pembuatan paduan Ti tanpa kandungan V sedemikian hingga mempunyai sifat biokompatibel. Fungsi unsur V sebagai pembentuk fasa beta di substitusi dengan penambahan masing-masing unsur Mo dan Nb sebagai pembentuk fasa beta pada paduan Ti-Al. Pengerjaan penelitian pembuatan paduan Ti dilakukan dari pengerjaan peleburan hingga pengamatan struktur mikro dan pengujian kekerasan.

Kata kunci: Biokompatibel, Paduan Ti-Al, Fasa Beta, Mo, Nb

ABSTRACT

Name : Fendy Rokhmanto
Study Program : Metallurgy and Material
Title : Influence of Mo-Nb content in the alloy of metal implant (Ti-Al-Mo and Ti-Al-Nb) for the beta phase formation

There are three types of metal alloys which are biocompatible there are of stainless steel free Ni, Co-Cr alloy and Ti alloy. Ti alloys that mostly used and functioned as a product is Ti-Al-V. Content of Al, is used to increase the strength and promote alpha phase and V have the same function, used to increase the strength and promote beta phase. Alloy Ti-Al-V is not biocompatible because of V content as a cause of allergy to the body. In this study conducted by making Ti alloys without V such that the content has biocompatible properties. Elements of V as a function of beta phase forming is substitution with the addition of each element Mo and Nb as the beta-phase formation in Ti-Al alloys. The research process carried out from Ti alloy smelting process to the observation of micro structure and hardness testing.

Key words: Biocompatible, Ti-Al Alloys, Beta phase, Mo, Nb

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Hipotesis	3
BAB 2 LANDASAN TEORI	
2.1 Titanium	5
2.2 Logam Aluminium	10
2.3 Logam Molibdenum	10
2.4 Logam Niobium	11
2.5 Desain Titanium Paduan	12
2.6 Laku Panas Titanium	15
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Desain Komposisi	21
3.2 Penyediaan Bahan Baku	21
3.3 Pengerjaan Peleburan	23
3.4 Homogenisasi	24
3.5 Pengerjaan Tempa	25
3.6 Proses Perlakuan Panas	28
3.7 Pengamatan Struktur Mikro	28
3.8 Uji Komposisi	30
3.9 Uji Kekerasan	30
3.10 Diagram Alir Penelitian	31
BAB 4 HASIL PERCOBAAN DAN PEMBAHASAN	
4.1 Uji Komposisi	32
4.2 Pengaruh Alumunium Dalam Paduan Titanium	33
4.2.1 Pengaruh Alumunium Terhadap Kekerasan	33
4.2.2 Pengaruh Alumunium Terhadap Stuktur Mikro	34
4.3 Pengaruh Molybdenum Dalam Paduan Titanium	36
4.3.1 Pengaruh Alumunium Terhadap Stuktur Mikro	36
4.3.2 Pengaruh Molybdenum Struktur Mikro	39

4.4 Hubungan Antara Banyak Butir Fasa Beta Dengan Kandungan unsur pepadu	42
4.5 Pengaruh Niobium Dalam Paduan Titanium	45
4.5.1 Pengaruh Niobium Terhadap Kekerasan	45
4.5.2 Pengaruh Niobium Terhadap Struktur Mikro	50
4.6 Perbedaan penambahan unsur Mo dan Nb sebagai penstabil fasa beta	54

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan	56
----------------------	----

DAFTAR REFFERENSI



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur Kristal Titanium	5
Gambar 2.2 Pengaruh Unsur Padaun Pada Titanuim Paduan Terhadap Sifat Mekanis Paduan	7
Gambar 2.3 Biokompabilitas Unsur Paduan Pada Titanium.....	14
Gambar 2.4 Skematik Proses Laku Panas	17
Gambar 3.1 Bahan Penelitian	22
Gambar 3.2 Tungku Busur Listrik	23
Gambar 3.3 Sampel Hasil Coran	24
Gambar 3.4 Tungku Tube Furnace	25
Gambar 3.5 Sampel Hasil Homogenisasi	25
Gambar 3.6 Pengaruh Prosentase Kandungan Unsur Paduan Dan Temeperatur Terhadap Pembentukan Fasa	26
Gambar 3.7 Mesin Tempa.....	27
Gambar 3.8 Sampel Hasil Tempa	27
Gambar 3.9 Mesin Uji Kekerasan	30
Gambar 3.10 Diagram Alir Penelitian	31
Gambar 4.1 Foto Struktur Mikro Ti-Al Laku Panas 1000 °C	35
Gambar 4.2 Foto Struktur Mikro Ti-Al Laku Panas 1100 °C	35
Gambar 4.3 Grafik Pengaruh Mo Terhadap Kekerasan	37
Gambar 4.4 Hasil Pengamatan SEM EDAX paduan Ti-6Al-4%Mo pada fasa α	38
Gambar 4.5 Hasil pengamatan SEM EDAX paduan Ti-6Al-4%Mo pada fasa β	39
Gambar 4.6 Foto Struktur Mikro Ti-Al-2% Mo	40
Gambar 4.7 Foto Struktur Mikro Ti-Al-4% Mo	41
Gambar 4.8 Foto Struktur Mikro Ti-Al-6% Mo	41
Gambar 4.9 Contoh Perhitungan Prosentase Fasa	42
Gambar 4.10 Prosentae Kandungan Mo Dalam Paduan.....	44
Gambar 4.11 Prosentae Kandungan Nb Dalam Paduan Laku Panas 1000°C ...	44
Gambar 4.12 Prosentae Kandungan Nb Dalam Paduan Laku Panas 1100°C ...	45
Gambar 4.13 Grafik Pengaruh Nb Terhadap Kekerasan.....	46
Gambar 4.14 Grafik Pengaruh Nb Terhadap Kekerasan Pada Suhu 1100 °C ...	47
Gambar 4.15 Hasil SEM EDAX paduan Ti-6%Al-7%Nb pada fasa α	49
Gambar 4.16 Hasil SEM EDAX paduan Ti-6%Al-7%Nb pada fasa β	49
Gambar 4.17 Foto Struktur Mikro Ti-Al-1% Nb	50
Gambar 4.18 Foto Struktur Mikro Ti-Al-4% Nb	51
Gambar 4.19 Foto Struktur Mikro Ti-Al-7% Nb	51
Gambar 4.20 Foto Struktur Mikro Ti-Al-1% Nb Laku Panas 1100 °C	53
Gambar 4.21 Foto Struktur Mikro Ti-Al-4% Nb Laku Panas 1100 °C	53
Gambar 4.22 Foto Struktur Mikro Ti-Al-7% Nb Laku Panas 1100 °C	54
Gambar 4.23 Grafik Pengaruh Mo dan Nb Terhadap Kekerasan	55
Gambar 4.24 Grafik Pengaruh Mo dan Nb Terhadap Prosentase Fasa Beta ...	55

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Derajat Biokompabililtas Material	4
Tabel 2.2 Contoh Aplikasi Titanium Paduan	9
Tabel 2.3 Nilai Bo Dan Md Unsur Paduan Titanium	13
Tabel 2.4 Proses Laku Panas Pada Titanium Paduan	15
Tabel 2.5 Proses Laku Panas Stress Relieving Pada Titanium Paduan	18
Tabel 2.6 Proses Laku Panas Anneling Pada Titanium Paduan	19
Tabel 2.7 Proses Laku Panas Solution Treatment Aging Pada Titanium Paduan	20
Tabel 3.1 Pengaturan Komposisi Berat	21
Tabel 3.2 Pengkodean Sampel penelitian	22
Tabel 3.3 Faktor Pengali Jefferies	29
Tabel 4.1 Hasil Uji Komposisi	32
Tabel 4.2 Nilai Kekerasan Paduan Ti-Al	33
Tabel 4.3 Nilai Kekerasan Paduan Ti-Al-Mo	36
Tabel 4.4 Nilai Kekerasan Ti-Al dan Ti-Al-Mo	36
Tabel 4.5 Prosentase Fasa Beta Dalam Sampel Penelitian	43
Tabel 4.6 Nilai Kekerasan Paduan Ti-Al-Nb Pada Suhu 10000C	45
Tabel 4.7 Nilai Kekerasan Ti-Al dan Ti-Al-Nb	46
Tabel 4.8 Nilai Kekerasan Paduan Ti-Al-Nb Pada Suhu 1100 °C	47

BAB 1

PENDAHULUAN

Kerusakan tulang akibat kecelakaan lalulintas ataupun kecelakaan kerja tidak dapat dihindarkan meski prosedur keselamatan telah banyak dikembangkan. Tulang merupakan organ vital dalam tubuh manusia, oleh karena itu berbagai cara dikembangkan untuk memperbaiki kerusakan tulang. Salah satu usaha perbaikan tulang yaitu dengan metode implan, dalam metode implan ini perlu disiapkan material implan yang memenuhi persyaratan implan material yaitu material yang dapat diterima oleh tubuh.

1.1 Latar Belakang Masalah

Dalam kondisi tertentu, tim medis ortopedi membutuhkan material implan yang bersifat biokompatibel sebagai pengganti tulang rusak atau patah, dan sebagai pengganti gigi permanen. Material implan bukan hanya difungsikan sebagai pengganti jaringan keras (tulang), tetapi juga difungsikan sebagai media tumbuhnya jaringan lunak (otot). Implan merupakan istilah yang digunakan untuk logam yang ditanamkan ke dalam tubuh untuk mengatasi tulang yang rusak atau patah. Logam yang digunakan ini haruslah memiliki sifat-sifat tertentu yang dapat mendukung ketika digunakan sebagai implan ke dalam tubuh. Sifat ini disebut biokompatibilitas material implan, artinya logam yang diimplankan ke dalam tubuh tidak mengalami reaksi penolakan, sehingga saat material ini dimasukkan ke dalam tubuh, maka tubuh tidak menganggap sebagai material asing, bahkan jaringan keras (tulang) dan jaringan lunak (otot) dapat tumbuh di permukaannya^[1]. Jadi tidak semua logam bisa dijadikan implan, karena banyak hal yang harus dipertimbangkan demi keamanannya bagi tubuh pasien. Jadi, aman atau tidak amannya logam yang digunakan untuk menyambung tulang sangat ditentukan oleh sifat biokompatibilitas material. Implan merupakan salah satu dari aplikasi biomaterial yang sedang dan akan terus dikembangkan karena kebutuhan yang semakin semakin meningkat.

Ada tiga Jenis material implan, yaitu plastik, keramik, dan logam. Dipilihnya material logam, karena sifat mekanik yang dimiliki, yaitu kekuatan tinggi dan tangguh. Sifat ini tidak dimiliki oleh plastik dan keramik. Untuk material logam khususnya, ada tiga jenis logam paduan yang mempunyai sifat biokompatibel, yaitu *stainless steel free Ni* paduan Kobal dan Titanium^[1]. Paduan Titanium untuk pembuatan komponen pada umumnya mengandung 6% Al, dan 2-4% V. Kandungan Al berfungsi sebagai penguat (reinforce) karena terbentuknya fasa intermetalik $TiAl_3$ ^[2]. Sedangkan kandungan unsur Vanadium di fungsikan sebagai pembentuk fasa beta. Fasa beta yang terbentuk dalam matrik alfa didalam paduan Ti-6%Al akan meningkatkan kekuatan dan kekerasan logam paduan^[3,4]. Masalah yang dihadapi pada paduan implan ini, adalah adanya kandungan unsur Vanadium mengakibatkan alergi^[1,5]. Oleh karena itu didalam pembuatan paduan Ti sebagai paduan implan diusahakan tidak mengandung V, sedemikian hingga fungsi unsur V ini di substitusi dengan unsur logam lain. Pada penelitian ini digunakan unsur Molybdenum (Mo) dan Niobium (Nb), sebagai unsur pembentuk fasa beta^[3,4].

1.2 Rumusan Masalah

Pembentukan fasa β di dalam paduan $Ti\alpha-\beta$ dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan^[3,4]. Terbentuknya fasa β dalam paduan dapat dilakukan dengan penambahan logam Vanadium (V) sebagai penstabil fasa β . Permasalahan yang timbul adalah unsur V merupakan penyebab terjadinya alergi pada tubuh karena unsur V ini bersifat toksik atau beracun. Untuk menghindari unsur V yang beracun ini maka dilakukan substitusi dengan unsur penstabil fasa β yang lain yaitu Molybdenum (Mo) dan Niobium (Nb).

1.3 Tujuan Penelitian

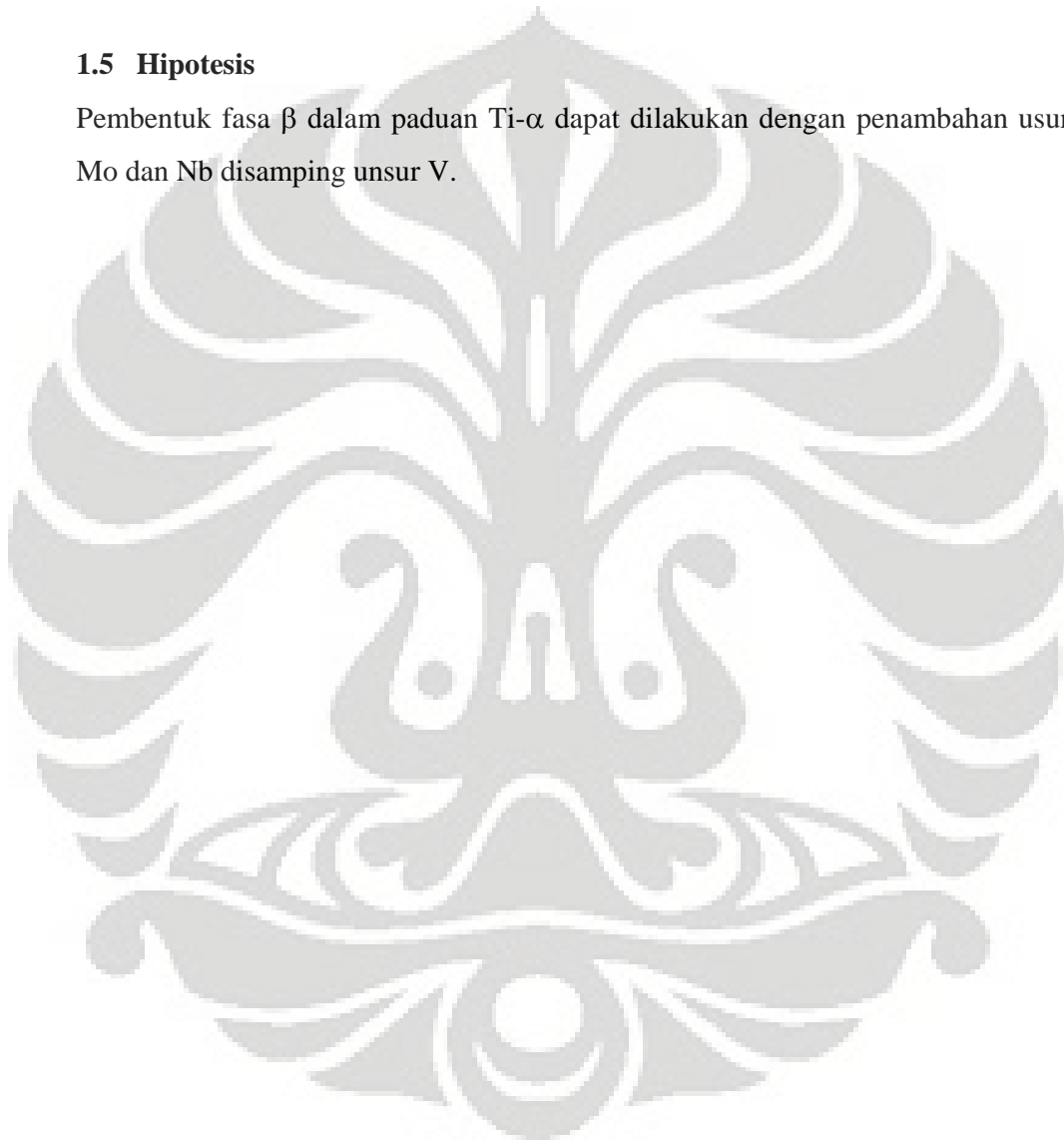
Penelitian ini ditujukan untuk mengetahui pengaruh kandungan Mo dan Nb terhadap pembentukan fasa β pada paduan Ti-Al, sebagai material implan.

1.4 Batasan Masalah

Paduan Ti ini menggunakan tipe α , dengan paduan Ti-Al sebagai logam dasar. Selanjutnya paduan Ti-Al, ditambah unsur pembentuk fasa beta, masing-masing unsur Mo dan Nb, yaitu 2%-6% Mo dan 2%-6% Nb.

1.5 Hipotesis

Pembentuk fasa β dalam paduan Ti- α dapat dilakukan dengan penambahan unsur Mo dan Nb disamping unsur V.



BAB 2

LANDASAN TEORI

Dalam kondisi tertentu tim medis orthopedic membutuhkan material implan yang bersifat biokompatibel sebagai pengganti tulang rusak. Material implan tidak hanya difungsikan sebagai pengganti jaringan keras (tulang), tapi juga digunakan untuk media tumbuhnya jaringan lunak (otot)^[1].

Material implan sudah dikenal sejak lama, mulai dari logam, keramik dan plastik. Dalam perkembangannya material implan berbahan dasar logam menjadi lebih sering digunakan. Pemilihan logam sebagai bahan dasar material implan lebih karena sifat mekanis yang lebih baik bila dibandingkan dengan bahan dasar material implan yang lainnya. Material logam pada khususnya, terdapat tiga jenis paduan yang memiliki sifat biokompatibel, yaitu *stainless steel free Ni*, paduan Kobal Co-Cr, dan paduan Titanium^[1].

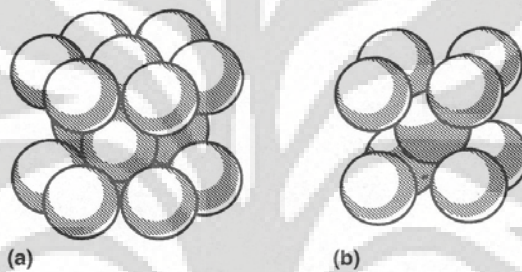
Tabel 2.1 Derajat Biokompabilitas Material ^[1]

Pattern of osteogenesis	Biomaterials	
Intervened osteogenesis	Stainless steel, Vitallium, PMMA	Biotolerant materials
Contact osteogenesis	Titanium, Titanium alloys, Carbon, Alumina, Zirconia, Titania, TiN, Si ₃ N ₄	Bioinert materials
Bonding osteogenesis	Bioglass, Ceravital, Tricalcium phosphate, Hydroxyapatite, A-W glass ceramic	Bioactive materials

Titanium paduan merupakan material logam implan yang paling sering digunakan. Penggunaan paduan Titanium sebagai logam implan didasarkan oleh kemampuan biokompatibel yang baik, ringan, kuat, tangguh, sifat mekanis yang baik dan ketahanan korosi yang baik^[1]. Seperti dalam Tabel 2.1 di atas tampak bahwa Titanium mempunyai sifat biokompatibel yang lebih baik bila dibandingkan dengan logam implan yang lain. Pengertian material biokompatibel sendiri adalah material yang dapat diterima oleh tubuh itu, bahkan jaringan keras (tulang) atau lunak (otot) bisa tumbuh di permukaan material ini^[1].

2.1 Logam Titanium

Titanium mempunyai sifat mekanis yang baik, antar lain ringan, kuat, tangguh, ketahanan korosi, dan bersifat biokompatibel. Titanium mempunyai dua struktur kristal yaitu HCP (*hexagonal closed packed*) dan BCC (*body center cubic*). Struktur kristal HCP sering disebut sebagai fasa alfa (α), dan BCC disebut sebagai fasa beta (β)^[3,4]. Struktur alfa terbentuk pada suhu kamar/ rendah dan struktur beta terbentuk pada suhu tinggi. Gambar 2.1 di bawah merupakan ilustrasi dari struktur kristal Titanium.



Gambar 2.1 Struktur Kristal Titanium (A) HCP, (B) BCC^[3,4]

Fasa yang terbentuk pada paduan Titanium dapat dijadikan acuan untuk pengelompokan paduan Titanium dalam produksi. Pengelompokan tersebut dibagi dalam paduan $Ti\alpha$, paduan $Ti\alpha-\beta$ dan paduan $Ti\beta$ ^[3,4].

- Paduan $Ti-\alpha$

Paduan alfa adalah Titanium murni yang diperkuat dengan *solid solution strengthening* dengan unsur penambah seperti Aluminium (5-6%), Tin, Nikel, dan Tembaga. Paduan alfa tidak mengandung beta pada temperatur ruang. Paduan alfa kurang *ductile* dan lebih sulit dibentuk, karena terbatasnya slip sistem pada HCP, tidak dapat di-*heat treatment*, dapat dilas, memiliki kekuatan sedang, derajat kekerasan bagus, ketahanan *creep* yang baik, tangguh dan sangat stabil pada temperatur diatas 540⁰C. Mampu bentuk dari paduan ini dapat diperbaiki dengan proses perlakuan panas *annealing*^[3,4].

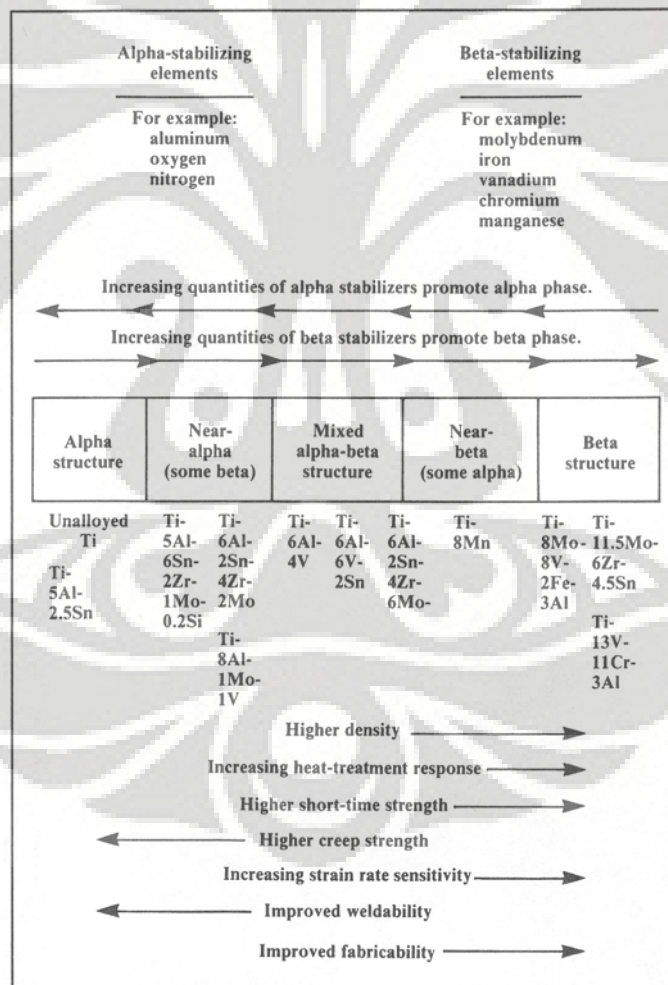
- Paduan Ti- α - β

Paduan alfa-beta adalah paduan Titanium yang strukturnya mengandung sebagian alfa dan sebagian beta pada temperatur ruang, dengan adanya fasa beta akan memperbaiki mampu bentuk paduan, sedangkan fasa alfa yang terbentuk berfungsi sebagai matrik pengikat paduan^[3,4]. Paduan Alfa-beta memiliki sifat mekanik yang sangat seimbang, dan yang paling sering digunakan, ada yang dapat dilas dan tidak, ketahanan korosinya sangat tinggi pada temperatur ruang, lebih mudah dibentuk, dan sangat stabil sampai temperatur 425⁰C. Unsur-unsur beta stabiliser seperti Molibdenum, Niobium, Vanadium, dan Tantalum ketika ditambahkan ke Titanium murni cenderung menaikkan fasa beta pada temperatur ruang. Sedangkan unsur alfa stabiliser akan menaikkan fasa alfa.

Salah satu paduan Titanium seperti TI-6Al-4V yang mengandung 6% Aluminium dan 4% Vanadium memiliki struktur 2 fasa, yaitu setengah alfa dan setengah beta pada temperatur ruang, Aluminium menstabilkan fasa alfa dan Vanadium menstabilkan fasa beta. Ketika paduan ini dipanaskan sampai pada temperatur 955⁰C, paduan bertransformasi semua menjadi struktur beta. Ketika di-*water quench* sampai temperatur ruang, fasa beta akan seimbang, paduan akan bertransformasi menjadi fasa alfa namun dicegah dengan *water quench*. Proses ini disebut *solution treating*, dan paduan memiliki kekuatan tinggi pada kondisi ini, namun kekerasan dan kekuatan dapat lebih ditingkatkan dengan *aging* selama 4 jam pada 539⁰C. Saat *aging*, dipisahkan bagian fasa alfa dengan fasa beta yang seimbang. Dengan demikian, alfa-beta alloys adalah paduan hasil *precipitation hardening*^[3,4]. Ada beragam paduan alfa-beta dengan kekuatan yang berbeda dan dengan mekanisme *precipitation hardening* yang berbeda, namun 6Al-4V adalah yang banyak diaplikasikan.

- Paduan Ti β

Paduan beta dihasilkan dengan menambahkan sejumlah besar beta stabiliser seperti Mo, Nb dan V, untuk membuat fasa beta stabil pada temperatur ruang. Paduan beta memiliki *ductility* bagus, dan mudah dibentuk ketika tidak di-*heat treatment*, dapat dilas, dan sangat stabil pada temperatur di atas 315⁰C. Beberapa dapat di-*age hardening* untuk menyebabkan presipitasi fasa alfa atau senyawa intermetalik, dan menghasilkan kekuatan yang sangat tinggi namun *ductility* dan kekerasan berkurang^[3,4].



Gambar 2.2 Pengaruh Unsur Padaun Pada Titanuim Padan Terhadap Sifat Mekanis Paduan^[3]

Gambar 2.2 di atas menunjukkan bahwa unsur paduan pada titanium paduan mempengaruhi fasa yang terbentuk. Penambahan unsur dengan prosentase tertentu akan menentukan fasa yang terbentuk pada paduan Titanium. Aluminium merupakan penstabil α , dengan adanya unsur Al maka akan terbentuk fasa α dengan struktur kristal HCP. Molybdenum merupakan penstabil β , dengan adanya unsur Mo maka akan terbentuk fasa β dengan struktur kristal BCC^[3,4].

Paduan Titanium mempunyai beberapa variasi fasa yang terbentuk berdasarkan unsur pematunya. Kemampuan membentuk fasa ini mempengaruhi variasi dari sifat-sifat mekanis dari setiap paduan, oleh karena itu paduan Titanium banyak digunakan dalam bidang kehidupan. Tabel 2.2 di bawah merupakan peta kegunaan Titanium paduan. Berikut merupakan alasan luasnya aplikasi Titanium dalam berbagai aspek kehidupan^[3]:

- Memiliki *specific strength* yang tinggi, yaitu perbandingan kekuatan dengan massa jenisnya. Pada kekuatan yang sama, Titanium lebih ringan dari baja.
- Ketahanan lelah (*fatigue strength*) yang lebih tinggi daripada paduan Aluminium.
- Tahan suhu tinggi. Ketika temperatur pemakaian melebihi 150⁰C maka dibutuhkan Titanium karena Aluminium akan kehilangan kekuatannya secara nyata.
- Tahan korosi. Ketahanan korosi Titanium lebih tinggi daripada Aluminium dan baja.
- Dengan rasio berat-kekuatan yang lebih rendah daripada Aluminium, maka komponen-komponen yang terbuat dari Titanium membutuhkan ruang yang lebih sedikit dibanding Aluminium.
- Pada suhu tinggi Titanium memiliki struktur BCC yang bersifat ulet (*ductile*), sedangkan pada suhu ruang membentuk struktur HCP yang bersifat getas (*brittle*) dan sangat sensitif terhadap korosi tegangan (*stress corrosion*). Variasi struktur lain dapat diperoleh dengan membuat paduan dan perlakuan panas (*heat treatment*), sehingga sifatnya dapat dioptimalkan untuk aplikasi khusus.

Tabel 2.2 Contoh Aplikasi Titanium Padauan ^[3]**Aerospace**

Gas turbine engines
Aircraft structures
Spacecraft
Helicopter rotors

Power generation

Gas turbines
Steam turbines
Piping systems
Heat exchangers
Flue gas desulphurization systems

Chemical processing industries

Pressure and reaction vessels
Heat exchangers
Pipe and fittings
Liners
Tubing
Pumps
Condensers
Valves, ducting, and filters
Agitators

Oil, gas, and petroleum processing

Tubing and pipe
Liners
Springs
Valves
Risers

Biomedical

Artificial joint prostheses
Bone plates, intramedullary rods, etc.
Heart valves
Pacemakers
Dental implants
Attachment wire
Surgical instruments
Wheelchairs

Architectural

Roofing
Window frames
Eaves and gables
Railings
Ventilators

Automotive

Body panels
Connecting rods
Valves and valve springs
Rocker arms

Marine

Surface ship hulls
Deep-sea submersibles
Pleasure boat components
Racing yacht components
Shipboard cooling systems
Ship propellers
Service water systems
Ducting
Fire pumps
Water jet propulsion systems

Fashion and apparel

Eyeglasses
Jewelry
Watches
Writing instruments

Sports

Golf clubs
Bicycle frames, gears, etc.
Lacrosse sticks
Racing wheelchairs
Horseshoes
Tennis rackets
Scuba gas cylinders
Skis
Pool cues

Miscellaneous

Shape memory alloys
Pollution control systems
Hand tools
Desalination systems
Military vehicle armor
Hunting knives
Backpack cookware

Tabel 2.2 di atas menunjukkan bahwa Titanium menduduki peran penting dalam aspek kehidupan. Paduan Ti-6Al-4V, merupakan salah satu paduan yang paling banyak digunakan, karena memiliki kekerasan, kekuatan, ketangguhan dan ketahanan korosi yang baik. Padaun Titanium tersebut merupakan paduan Ti tipe α - β , dengan 6 %Al sebagai pembentuk fasa α dan 4%V sebagai pembentuk fasa β .

2.2 Logam Aluminium

Aluminium di alam ditemukan dalam bentuk senyawa alumina (Al_2O_3). Sifat-sifat aluminium oksida antara lain:

- Aluminium oksida adalah insulator (penghambat) panas dan listrik yang baik^[6]. Al_2O_3 dipakai sebagai bahan abrasif dan sebagai komponen dalam alat pemotong, karena sifat kekerasannya.
- Aluminium oksida berperan penting dalam ketahanan logam Aluminium terhadap perkaratan dengan udara. Logam Aluminium sebenarnya mudah bereaksi dengan oksigen di udara. Aluminium bereaksi dengan oksigen membentuk aluminium oksida, yang terbentuk sebagai lapisan tipis yang dengan cepat menutupi permukaan Aluminium^[6]. Lapisan ini melindungi logam Aluminium dari oksidasi lebih lanjut. Ketebalan lapisan ini dapat ditingkatkan melalui proses anodisasi. Beberapa paduan logam, seperti perunggu Aluminium, memanfaatkan sifat ini dengan menambahkan Aluminium pada alloy untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi.

2.3 Logam Molibdenum

Logam Molibdenum tidak terdapat di alam, tapi diperoleh dari bijih Molibdenit. Molibdenum juga terdapat dalam mineral wufenit dan powelit dengan kadar yang sedikit. Molibdenum juga didapat sebagai hasil samping operasi penambangan tembaga dan Wolfram. Molibdenum diperoleh dari proses reduksi serbuk molibdi trioksida yang dimurnikan atau ammonium Molibdate, dengan Hidrogen^[7].

Molibdenum mempunyai karakteristik berwarna putih keperak-perakan, sangat keras (tapi lebih lembut dan bisa ditempa daripada wolfram). Elastisitasnya tinggi, dan mempunyai titik lebur yang tinggi (2623°C)^[7]. Molibdenum merupakan zat pencampur paduan yang sangat bernilai, karena mempengaruhi kemampuan pengerasan baja dan melembutkannya. Molibdenum juga menambah kekuatan baja pada suhu tinggi.

Molibdenum digunakan pada alloy tertentu yang berbasis Nikel, seperti Hastelloy, yang mana tahan panas dan tahan korosi bahan kimia. Molibdenum juga digunakan dalam nuklir, dan dalam pembuatan suku cadang rudal dan pesawat terbang. Molibdenum merupakan katalis penting dalam pemurnian minyak bumi. Juga diterapkan sebagai bahan filamen dalam dunia elektronik. Molibdenum sulfida adalah pelumas yang sangat berguna, khususnya pada suhu tinggi di mana oli mudah terurai.

2.4 Logam Niobium

Niobium ditemukan dalam mineral Niobit (atau kolumbit), niobit-tantalit, paroklor dan euksenit. Niobium dengan kadar tinggi ditemukan bergabung bersama karbonatit (batuan karbon-silikat). Niobium mempunyai karakteristik berwarna putih berkilau, lunak dapat ditempa dan mempunyai titik lebur tinggi (2477°C). Bila terpapar dengan udara pada suhu kamar dengan waktu yang cukup lama, warnanya berubah menjadi kebiru-biruan. Logam ini teroksidasi di udara pada suhu 200°C ^[8]. Dengan demikian, Niobium harus terlindung dari udara atmosfer bila akan diproses karena cenderung bereaksi dengan oksigen, karbon, halogen, nitrogen, dan belerang. Logam Niobium adalah inert untuk asam, bahkan untuk aqua regia pada suhu kamar, tetapi tidak tahan terhadap asam pekat, dan alkali.

Niobium digunakan untuk produksi temperatur tinggi paduan tahan karat dan baja stainless khusus. Sejumlah kecil Niobium memberi kekuatan yang lebih besar dibanding logam lain, terutama mereka yang terkena suhu rendah. Niobium

karbida digunakan dalam alat pemotong. Digunakan dalam paduan baja stainless untuk reaktor nuklir, jet, rudal, alat pemotong, pipa, super magnet dan pengelasan batang. Niobium-kaleng dan Niobium-paduan Titanium digunakan sebagai kabel untuk superkonduksi mampu menghasilkan medan magnet yang sangat kuat. Niobium juga digunakan dalam bentuk murni untuk membuat struktur superkonduktor untuk mempercepat partikel akselerator. Niobium paduan digunakan dalam bedah implan karena mereka tidak bereaksi dengan jaringan tubuh manusia^[1].

2.5 Desain Titanium Paduan

Paduan Titanium untuk biokompatibel menggunakan paduan tipe α - β , karena sifat mampu bentuk baik, ketahanan korosi tinggi dan variabel proses dapat dikontrol^[1,5]. Desain paduan Titanium α - β dapat ditentukan berdasarkan perhitungan molekular orbital. Parameter yang digunakan dalam perhitungan adalah kekuatan ikatan antar atom, yang dinotasikan sebagai Bo (bond order) dan keelektronegativan dari elemen material, yang dinotasikan sebagai Md (metal d-orbital energy level)^[9]. Tingkat kestabilan fasa dalam paduan ditentukan oleh nilai dari Bo dan Md masing-masing unsur pepadu. Unsur Al, sebagai contoh mempunyai nilai Bo dan Md yang tinggi maka fasa yang terbentuk adalah fasa alfa, sedangkan kestabilan fasa β akan terbentuk dengan kenaikan nilai Bo dan penurunan nilai Md. Dengan kata lain dapat ditentukan dengan melihat selisih nilai Bo dan Md tiap unsur pepadu. Semakin kecil perbedaan nilai maka akan terbentuk fasa α , begitu sebaliknya semakin besar perbedaan nilainya maka akan terbentuk fasa β . Sebagai contoh pada unsur Al dengan perbedaan nilai Bo dan Md sebesar 0,226, maka terbentuk fasa α , sedangkan pada unsur Mo terbentuk fasa β dengan perbedaan nilai Bo dan Md sebesar 1,102. Tabel 2.3 dibawah menunjukkan besaran nilai Bo dan Md tiap unsur pepadu dalam paduan Titanium.

Tabel 2.3 Nilai Bo Dan Md Unsur Paduan Titanium ^[9]

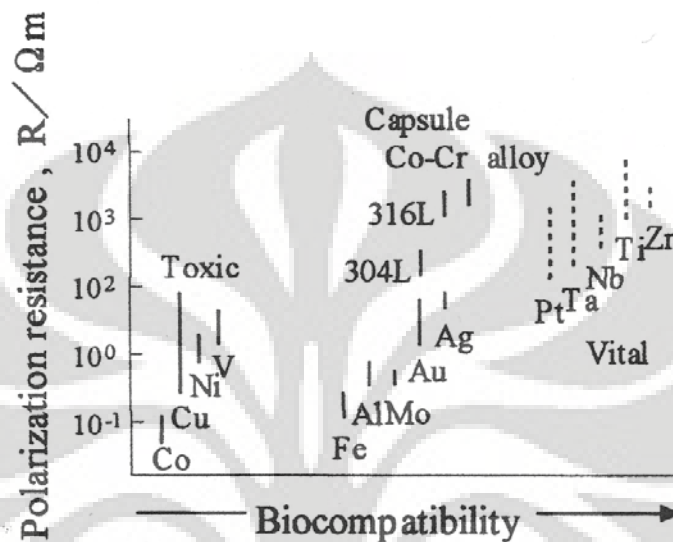
3d Elements	Bo	Md(eV)	4d Elements	Bo	Md(eV)
Ti	2.790	2.447	Zr	3.086	2.934
V	2.805	1.872	Nb	3.099	2.424
Cr	2.779	1.478	Mo	3.063	1.961
Mn	2.723	1.194	Tc	3.026	1.294
Fe	2.651	0.969	Ru	2.704	0.859
Co	2.529	0.807	Rh	2.736	0.561
Ni	2.412	0.724	Pd	2.208	0.347
Cu	2.114	0.567	Ag	2.094	0.196

5d Elements	Bo	Md(eV)	Non-transition elements	Bo	Md(eV)
Hf	3.110	2.975	Al	2.426	2.200
Ta	3.144	2.531	Si	2.561	2.200
W	3.125	2.072	Sn	2.283	2.100
Re	3.061	1.490			
Os	2.980	1.018			
Ir	3.168	0.677			
Pt	2.252	0.146			
Au	1.953	0.258			

Paduan Titanium Ti-6Al-4V merupakan salah satu paduan Titanium yang paling banyak digunakan dalam aplikasi kehidupan. Paduan Titanium Ti-6Al-4V ELI, merupakan paduan Titanium yang paling sering digunakan untuk keperluan orthopedik. Paduan ini berbeda dengan paduan Ti-6Al-4V, letak perbedaannya terdapat pada kandungan Oksigen dan Nitrogen pada paduan Ti-6Al-4V ELI lebih rendah^[3,4]. Sebagai catatan kandungan Oksigen dan Nitrogen dalam paduan Titanium tidak dapat dihindarkan, meski dalam persentase yang sangat kecil.

Paduan Ti-6Al-4V, dapat juga digunakan sebagai material implan. Material implan dengan paduan Titanium tersebut, tidak bersifat biokompatibel, dikarenakan unsur V sebagai penstabil fasa β bersifat toxic atau beracun sehingga menyebabkan alergi pada tubuh. Tanpa adanya V dalam paduan, perlu adanya substitusi dengan unsur yang lain sebagai penstabil fasa β untuk mendapatkan sifat-sifat yang mendekati sama dengan paduan Ti-6Al-4V. Unsur yang digunakan

sebagai substitusi adalah unsur Mo dan Nb karena kedua unsur penstabil fasa β ini tidak beracun bagi tubuh^[5,9]. Gambar 2.3 di bawah memberi informasi tentang biokompabilitas dari beberapa logam.



Gambar 2.3 Biokompabilitas Unsur Paduan Pada Titanium^[5,9]

Paduan Titanium Ti-6Al-4V dapat ditingkatkan sifat mekanisnya dengan melakukan proses perlakuan panas, diantaranya *annealing* dan *thermo mechanical processing*. Proses *annealing* bertujuan untuk meningkatkan kekerasan dan ketangguhan material. *Thermo mechanical processing* untuk meningkatkan mampu bentuk material. Tabel 2.4 di bawah menunjukkan proses perlakuan panas pada Titanium paduan.

Tabel 2.4 Proses Laku Panas Pada Titanium Paduan ^[3,4]

Heat treatment	Procedure	Comments
Stress relief annealing	2 to 4 h 595 °C (1100 °F), air cool	Relieves residual stresses from welding, forming, etc. This cycle only provides a partial stress relief. A full anneal must be used for full stress relief. Low strength, good ductility
Full annealing (mill annealing)	2 h, 735 ± 15 °C (1355 ± 25 °F), air cool	Most common heat treatment, has good overall properties combinations. Low strength, good ductility
Annealing for continuously rolled sheet	5 min 870 °C (1600 °F), rapid furnace cooled, plus 5 min 595 °C (1100 °F), air cool	Approximately the same strength and ductility as above, but with improved fracture toughness
Recrystallization annealing	4 or more h, 925 °C (1695 °F), furnace cool to 760 °C (1400 °F) at 55 °C (100 °F)/h (or slower), cool to 480 °C (900 °F) at 370 °C (700 °F)/h (or faster), air cool	Usually used for ELI material. Strength comparable to above conditions, but improved damage tolerance (fracture toughness, stress-corrosion resistance, reduced crack growth rates). Strength is lower for ELI material
Duplex annealing	10 min, 940 °C (1725 °F), air cool, plus 4 h 675 °C (1245 °F), air cool	Improved damage tolerance
Beta annealing	30 min, 1035 °C (1895 °F), air cool, plus 2 h, 730 °C (1345 °F), air cool	Used to maximize damage tolerance properties. These properties are attained with a slight loss of ductility and a significant fatigue loss. A preliminary treatment followed such as annealing
Beta STA	30 min, 1035 °C (1895 °F), water quench plus 4 h, 510 to 680 °C (950 to 1250 °F)	...
Beta STOA	30 min, 1035 °C (1895 °F), water quench plus 2 to 4 h, 675 to 730 °C (1245 to 1345 °F)	Similar to beta anneal with improvement in fatigue performance. May be preferable to beta anneal because of improved fatigue properties, but at a cost in damage tolerant properties
Solution heat treatment	10 min, 940 °C (1725 °F), water quench	Used as an intermediate step for forming material ultimately to be used in the STA condition. Not to be used as a final condition due to instability
Solution heat treatment and aging	10 min, 940 °C (1725 °F), water quench, plus 4 h, 510 to 540 °C (950 to 1000 °F), air cool	Highest strength condition, but less ductility, stress-corrosion resistance, and fracture toughness than annealed
Solution heat treatment and overaging	10 min, 940 °C (1725 °F), water quench, plus 4 h, 675 °C (1245 °F), air cool	Strength intermediate between annealed and STA, but improved ductility and damage tolerance properties compared to STA

2.6 Perlakuan Panas Titanium

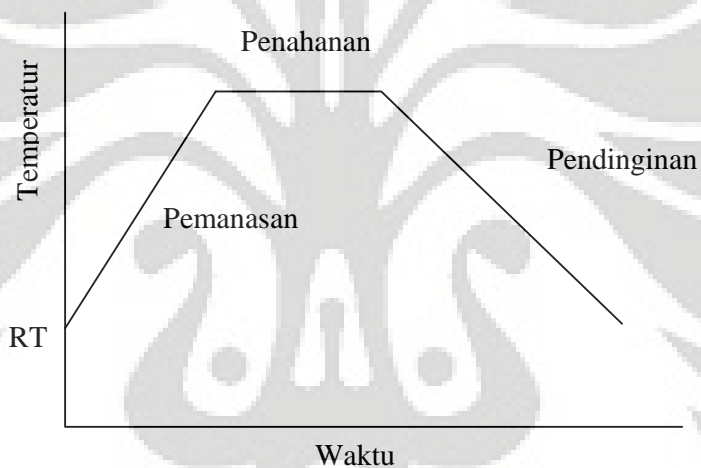
Perlakuan panas merupakan satu metoda dalam memodifikasi material. Prinsip dari perlakuan panas adalah memanaskan material sampai suhu tertentu dan ditahan beberapa waktu, kemudian didinginkan sehingga material bertransformasi

dan karakteristiknya dapat berubah. Secara umum prinsip perlakuan panas adalah sebagai berikut:

- Tahap Pemanasan merupakan tahapan awal dari proses perlakuan panas dimana pada proses ini material dipanaskan hingga temperatur tertentu. Pada proses pemanasan ini diharapkan terjadi pada temperatur yang seragam hal ini bertujuan untuk menghindari distorsi dan keretakan pada sampel. Pemanasan pada temperatur yang seragam dapat dilakukan melalui proses pemanasan yang lambat. Laju pemanasan dari suatu logam tergantung dari beberapa faktor. Salah satu faktor utama yang mempengaruhi laju pemanasan yaitu konduktivitas panas dari logam tersebut dimana logam yang mempunyai konduktivitas panas yang tinggi akan mempunyai laju pemanasan yang cepat dibandingkan dengan logam yang mempunyai konduktivitas panas yang lebih rendah. Selain konduktivitas panas faktor lain yang juga mempengaruhi laju pemanasan yaitu dimensi atau potongan benda kerja. Dimensi benda kerja yang lebih besar membutuhkan laju pemanasan yang lebih lambat, hal ini dilakukan untuk mencegah terjadinya keretakan pada benda kerja.
- Tahap Penahanan merupakan tahapan setelah proses pemanasan. Penahanan bertujuan untuk mengubah struktur material dan memberikan kesempatan kepada tiap unsurnya untuk berdifusi hingga dapat larut secara homogen. Waktu penahanan pada proses pemanasan akan mempengaruhi tingkat kelarutannya, disamping meningkatnya homogenisasi panas. Waktu penahanan sangat berpengaruh pada saat transformasi karena apabila waktu penahanan yang diberikan kurang tepat atau terlalu cepat, maka transformasi yang terjadi tidak sempurna dan tidak homogen begitu juga jika waktu tahan terlalu pendek. Selain komposisi kimia dimensi benda uji terutama ketebalan benda uji sangat mempengaruhi pemberian waktu penahanan pada saat proses perlakuan panas.
- Tahap Pendinginan merupakan proses akhir dari perlakuan panas. Pada proses ini logam sudah tidak menerima pemanasan lagi melainkan proses

pelepasan panas hingga mencapai suhu tertentu yang berkaitan dengan struktur mikro akhir yang diinginkan. Pada proses pendinginan ini terjadi proses perpindahan panas dari benda kerja terhadap media pendingin secara konveksi yaitu pelepasan panas dari benda kerja ke media pendingin.

Berikut pada Gambar 2.4 merupakan ilustrasi dari proses perlakuan panas, mulai dari tahap pemanasan, penahanan dan pendinginan. tahap pendinginan juga dapat dilakukan secara bertingkat untuk dapat memperoleh struktur yang diinginkan. Proses pendinginan juga dapat dilakukan hingga suhu dibawah titik beku air (0°C), proses ini sering disebut sebagai *sub zero treatment*.



Gambar 2.4 Skematik Proses Laku Panas

Paduan Titanium juga dapat dimodifikasi sifat mekanisnya dengan cara melakukan proses perlakuan panas dalam kondisi *innert* yang bertujuan untuk menghindari oksidasi^[3,4]. Hasil proses perlakuan panas bergantung pada komposisi paduan dari material. Pada paduan $\text{Ti}\alpha$, tidak dapat ditingkatkan kekuatannya karena struktur mikro yang dimiliki, namun tegangan sisa dapat dihilangkan melalui proses *annealing*. Paduan $\text{Ti}\alpha-\beta$, merupakan paduan yang mudah untuk dimodifikasi sifat-sifatnya dengan memodifikasi struktur mikro melalui proses laku panas. Paduan $\text{Ti}\beta$, juga dapat dimodifikasi melalui proses *solution treatment*.

Perlakuan panas pada paduan Titanium dapat dikelompokkan menjadi beberapa proses. Pengelompokan ini didasarkan pada tujuan dari masing-masing proses.

- *Stress relieving*

Proses ini dilakukan untuk menghilangkan tegangan sisa akibat proses pengerjaan sebelumnya. Tabel 2.5 di bawah menunjukkan data proses *stress relieving* pada Titanium dan paduannya.

Tabel 2.5 Proses Laku Panas *Stress Relieving* Pada Titanium Paduan^[3,4]

Alloy	Temperature		Time, h
	°C	°F	
Commercially pure titanium (all grades)	480–595	900–1100	¼–4
α or near-α titanium alloys			
Ti-5Al-2.5Sn	540–650	1000–1200	¼–4
Ti-8Al-1Mo-1V	595–705	1100–1300	¼–4
Ti-2.5Cu (IMI 230)	400–600	750–1110	½–24
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	595–705	1100–1300	¼–4
Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.2Si (IMI 685)	530–570	980–1050	24–48
Ti-5.5Al-3.5Sn-3Zr-1Nb-0.3Mo-0.3Si (IMI 829)	610–640	1130–1190	1–3
Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb-0.5Mo-0.3Si (IMI 834)	625–750	1160–1380	1–3
Ti-6Al-2Cb-1Ta-0.8Mo	595–650	1100–1200	¼–2
Ti-0.3Mo-0.8Ni (Ti Code 12)	480–595	900–1100	¼–4
α-β titanium alloys			
Ti-6Al-4V	480–650	900–1200	1–4
Ti-6Al-7Nb (IMI 367)	500–600	930–1110	1–4
Ti-6Al-6V-2Sn (Cu + Fe)	480–650	900–1200	1–4
Ti-3Al-2.5V	540–650	1000–1200	¼–2
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	595–705	1100–1300	¼–4
Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si (IMI 550)	600–700	1110–1290	2–4
Ti-4Al-4Mo-4Sn-0.5Si (IMI 551)	600–700	1110–1290	2–4
Ti-5Al-2Sn-4Mo-2Zr-4Cr (Ti-17)	480–650	900–1200	1–4
Ti-7Al-4Mo	480–705	900–1300	1–8
Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.25Si	480–650	900–1200	1–4
Ti-8Mn	480–595	900–1100	¼–2
β or near-β titanium alloys			
Ti-13V-11Cr-3Al	705–730	1300–1350	½–¼
Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn (Beta III)	720–730	1325–1350	½–¼
Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo (Beta C)	705–760	1300–1400	¼–¼
Ti-10V-2Fe-3Al	675–705	1250–1300	½–2
Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn	790–815	1450–1500	½–¼

Parts can be cooled from stress relief by either air cooling or slow cooling.

- *Anneling*

Proses ini dilakukan untuk memodifikasi sifat-sifat material, sebagai contoh ketangguhan kekerasan dan keuletan dapat ditingkatkan melalui proses ini. Tabel 2.6 di bawah menunjukkan data proses *annealing* pada Titanium dan paduannya.

Tabel 2.6 Proses Laku Panas *Annealing* Pada Titanium Paduan^[3,4]

Alloy	Temperature		Time, h	Cooling method
	°C	°F		
Commercially pure Ti (all grades)	650–760	1200–1400	0.10–2	Air
α or near-α titanium alloys				
Ti-5Al-2.5Sn	720–845	1325–1550	0.167–4	Air
Ti-8Al-1Mo-1V	790(a)	1450(a)	1–8	Air or furnace
Ti-2.5Cu (IMI 230)	780–800	1450–1470	0.5–1	Air
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	900(b)	1650(b)	0.5–1	Air
Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.2Si (IMI 685)	(c)	(c)	...	...
Ti-5.5Al-3.5Sn-3Zr-1Nb-0.3Mo-0.3Si (IMI 829)	(c)	(c)	...	...
Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb-0.5Mo-0.3Si (IMI 834)	(e)	(c)	...	...
Ti-6Al-2Cb-1Ta-0.8Mo	790–900	1450–1650	1–4	Air
α-β titanium alloys				
Ti-6Al-4V	705–790	1300–1450	1–4	Air or furnace
Ti-6Al-7Nb (IMI 367)	700	1300	1–2	Air
Ti-6Al-6V-2Sn (Cu + Fe)	705–815	1300–1500	0.75–4	Air or furnace
Ti-3Al-2.5V	650–760	1200–1400	0.5–2	Air
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	(c)	(c)	...	...
Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si (IMI 550)	(c)	(c)	...	...
Ti-4Al-4Mo-4Sn-0.5Si (IMI 551)	(c)	(c)	...	...
Ti-5Al-2Sn-4Mo-2Zr-4Cr (Ti-17)	(c)	(e)	...	...
Ti-7Al-4Mo	705–790	1300–1450	1–8	Air
Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.25Si	705–815	1300–1500	1–2	Air
Ti-8Mn	650–760	1200–1400	0.5–1	(d)
β or near-β titanium alloys				
Ti-13V-11Cr-3Al	705–790	1300–1450	0.167–1	Air or water
Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn (Beta III)	690–760	1275–1400	0.167–1	Air or water
Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo (Beta C)	790–815	1450–1500	0.25–1	Air or water
Ti-10V-2Fe-3Al	(c)	(c)	...	...
Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn	790–815	1450–1500	0.0833–0.25	Air

(a) For sheet and plate, follow by 0.25 h at 790 °C (1450 °F), then air cool. (b) For sheet, follow by 0.25 h at 790 °C (1450 °F), then air cool (plus : at 595 °C, or 1100 °F, then air cool, in certain applications). For plate, follow by 8 h at 595 °C (1100 °F), then air cool. (c) Not normally supplied used in annealed condition. (d) Furnace or slow cool to 540 °C (1000 °F), then air cool.

- *Solution treatment aging*

Proses ini digunakan untuk menstabilkan fasa beta yang terbentuk pada suhu tinggi dalam suhu kamar. Tabel 2.7 di bawah menunjukkan data proses *solution treatment aging* pada Titanium dan paduannya.

Tabel 2.7 Proses Laku Panas *Solution Treatment Aging* Pada Titanium Paduan^[3,4]

Alloy	Solution temperature		Solution time, h	Cooling rate	Aging temperature		Aging time, h
	°C	°F			°C	°F	
α or near-α alloys							
Ti-8Al-1Mo-1V	980-1010(a)	1800-1850(a)	1	Oil or water	565-595	1050-1100	...
Ti-2.5Cu (IMI 230)	795-815	1465-1495	1/2-1	Air or water	390-410	735-770	8-24 (step 1)
				465-485	870-905	1100	8 (step 2)
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	955-980	1750-1800	1	Air	595	1100	8
Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.2Si (IMI 685)	1040-1060	1905-1940	1/2-1	Oil	540-560	1005-1040	24
Ti-5.5Al-3.5Sn-3Zr-1Nb-0.3Mo-0.3Si (IMI 829)	1040-1060	1905-1940	1/2-1	Air or oil	615-635	1140-1175	2
Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb-0.5Mo-0.3Si (IMI 834)	1020(b)	1870(b)	2	Oil	625	1155	2
α-β alloys							
Ti-6Al-4V	955-970(c)(d)	1750-1775(c)(d)	1	Water	480-595	900-1100	4-8
	955-970	1750-1775	1	Water	705-760	1300-1400	2-4
Ti-6Al-6V-2Sn (Cu + Fe)	885-910	1625-1675	1	Water	480-595	900-1100	4-8
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	845-890	1550-1650	1	Air	580-605	1075-1125	4-8
Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si (IMI 550)	890-910	1635-1670	1/2-1	Air	490-510	915-950	24
Ti-4Al-4Mo-4Sn-0.2Si (IMI 551)	890-910	1635-1670	1/2-1	Air	490-510	915-950	24
Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	845-870	1550-1600	1	Air	580-605	1075-1125	4-8
Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.25Si	870-925	1600-1700	1	Water	480-595	900-1100	4-8
β or near-β alloys							
Ti-13V-11Cr-3Al	775-800	1425-1475	1/2-1	Air or water	425-480	800-900	4-100
Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn (Beta III)	690-790	1275-1450	1/8-1	Air or water	480-595	900-1100	8-32
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (Beta C)	815-925	1500-1700	1	Water	455-540	850-1000	8-24
Ti-10V-2Fe-3Al	760-780	1400-1435	1	Water	495-525	925-975	8
Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn	790-815	1450-1500	1/4	Air	510-595	950-1100	8-24

(a) For certain products use solution temperature of 890 °C (1650 °F) for 1 h, then air cool or faster. (b) Temperature should be selected from transus approach curve to give desired α content. (c) For thin plate or sheet, solution temperature can be used down to 890 °C (1650 °F) for 6 to 30 min; then water quench. (d) This treatment is used to develop maximum tensile properties in this alloy.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Desain Komposisi

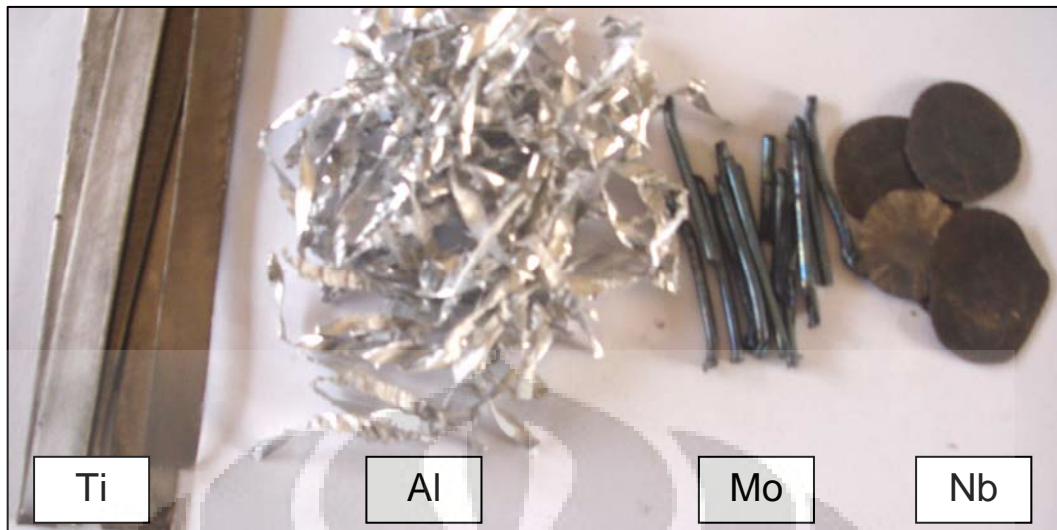
Penelitian ini dilakukan melalui pengaturan komposisi, pengerjaan peleburan hingga pengamatan struktur mikro dan uji kekerasan (Vickers). Dalam pengaturan komposisi menggunakan Ti-6%Al sebagai logam dasarnya. Kemudian masing-masing kandungan Mo dan Nb divariasikan. Kandungan Mo pada batas antara 2%-6% dan kandungan Nb pada batas antara 1%-7%. Dalam pengerjaan peleburan berat dibuat sama, yaitu masing-masing 6gram. Pengaturan berat yang disesuaikan dengan komposisi target ditunjukkan pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Pengaturan Komposisi Berat

Berat Sampel gram	Al (6%) gram	Mo gram	Nb gram	Ti gram	Jumlah	Keterangan
6	0.36	0	0	5.64	3	
6	0.36	0.12	0	5.52	3	2% Mo
6	0.36	0.24	0	5.40	3	4% Mo
6	0.36	0.36	0	5.28	3	6% Mo
6	0.36	0	0.06	5.58	3	1% Nb
6	0.36	0	0.24	5.40	3	4% Nb
6	0.36	0	0.42	5.22	3	7% Nb

3.2 Penyediaan Bahan Baku

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini adalah Titanium sebagai logam dasar, dan logam Aluminium, Molibdenum dan Niobium sebagai unsur logam pemuat. Tingkat kemurnian masing-masing unsur adalah logam Ti (99%), Al (98%), Mo (99,9%), Nb (99,9%). Bahan baku percobaan ditunjukkan pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Bahan Penelitian

Bahan baku yang telah tersedia dan telah didesain komposisinya kemudian dilakukan pengkodean untuk memudahkan dalam proses pengerjaannya. Adapun pengkodeannya seperti yang tampak pada Tabel 3.2 dibawah.

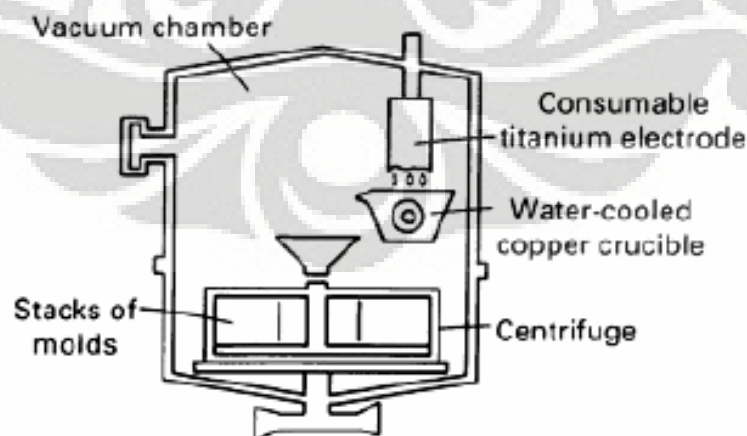
Tabel 3.2 Pengkodean Sampel Penelitian

Paduan	Kode Sampel	Kandungan Unsur (%)			Temperatur Proses (°C)	Keterangan
		Al	Mo	Nb		
Ti-Al	Al	6	-	-	1000	3 Sampel
	al.i	6	-	-	1100	3 Sampel
Ti-Al-Mo	2mo	6	2	-	1000	3 Sampel
	4mo	6	4	-	1000	3 Sampel
	6mo	6	6	-	1000	3 Sampel
Ti-Al-Nb	1nb	6	-	1	1000	3 Sampel
	4nb	6	-	4	1000	3 Sampel
	7nb	6	-	7	1000	3 Sampel
	1nb.i	6	-	1	1100	3 Sampel
	4nb.i	6	-	4	1100	3 Sampel
	7nb.i	6	-	7	1100	3 Sampel

3.3 Pengerjaan Peleburan

Proses peleburan Titanium memerlukan metode yang berbeda dengan logam yang lain seperti Aluminium, Besi dan Tembaga. Titanium mempunyai titik lebur yang tinggi 1812°C , unsur paduan Mo dan Nb yang digunakan sebagai logam paduan juga mempunyai titik lebur tinggi yaitu 2623°C dan 2477°C . Karena logam dasar dan logam pemuannya mempunyai titik lebur yang relatif tinggi, maka dalam pengerjaan peleburan menggunakan tungku busur listrik (*electric arc furnace*)^[3,4].

Logam dasar (Ti) dan unsur pemuannya, terutama unsur Al mempunyai afinitas terhadap oksigen yang tinggi. Oleh karena itu pengerjaan peleburan tidak mungkin dilakukan dilingkungan udara terbuka. Kedua logam tersebut akan teroksidasi oleh oksigen yang berada didalam udara. Jadi pengerjaan peleburan hanya bisa dilakukan didalam ruang tertutup dilingkungan inert, dimana menggunakan gas Argon sebagai lingkungannya. Sebagai wadah logam cair menggunakan krusibel tembaga murni yang dialiri air, sebagai pendingin krusibel. Gas Argon, selain berfungsi sebagai gas pelindung juga dapat meningkatkan suhu peleburan sehingga logam Ti beserta paduannya meleleh, kemudian terjadi proses pemuatan. Gambar 3.2 adalah skematik tungku busur listrik yang digunakan dalam penelitian.

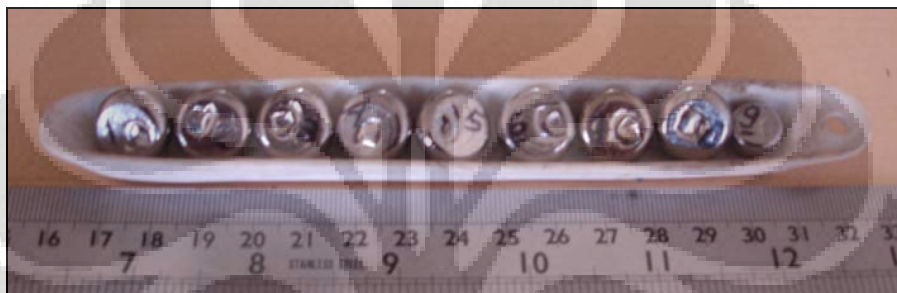


Gambar 3.2 Tungku Busur Listrik^[3,4]

Prosedur peleburannya adalah sebagai berikut:

- Logam paduan (Ti, Al, Mo/Nb) diletakkan dalam krusibel tembaga yang didinginkan dengan air
- Alirkan gas inert (Argon) kedalam ruang peleburan
- Arahkan elektroda tungsten ke krusibel hingga terjadi pancaran busur listrik, hingga logam leleh

Hasil peleburan ditunjukkan pada Gambar 3.3



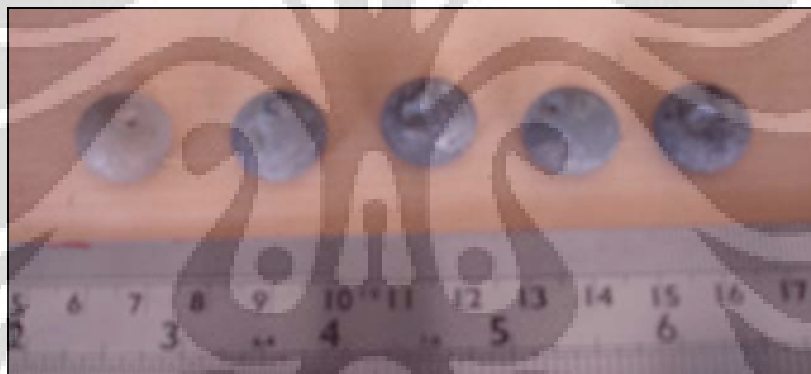
Gambar 3.3 Sampel Hasil Coran

3.4 Homogenisasi

Hasil coran pada umumnya, unsur padu yang berada didalamnya tidak larut padat homogen. Oleh karena itu perlu dilakukan homogenisasi, yaitu pemanasan pada suhu diatas $2/3$ dari titik lelehnya dalam waktu yang relatif lama. Selama pengerjaan homogenisasi, unsur padu yang konsentrasinya tinggi berdifusi ke segala arah sedemikian hingga menjadi larut padat homogen. Terhadap sampel hasil coran dilakukan pemanasan pada suhu 1150°C selama 12 jam. Dalam pengerjaan homogenisasi tetap menggunakan lingkungan inert (gas argon) di dalam tungku tabung (*tube furnace*), seperti yang ditunjukkan Gambar 3.4. Hasil pengerjaan homogenisasi ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.4 Tungku *Tube Furnace*



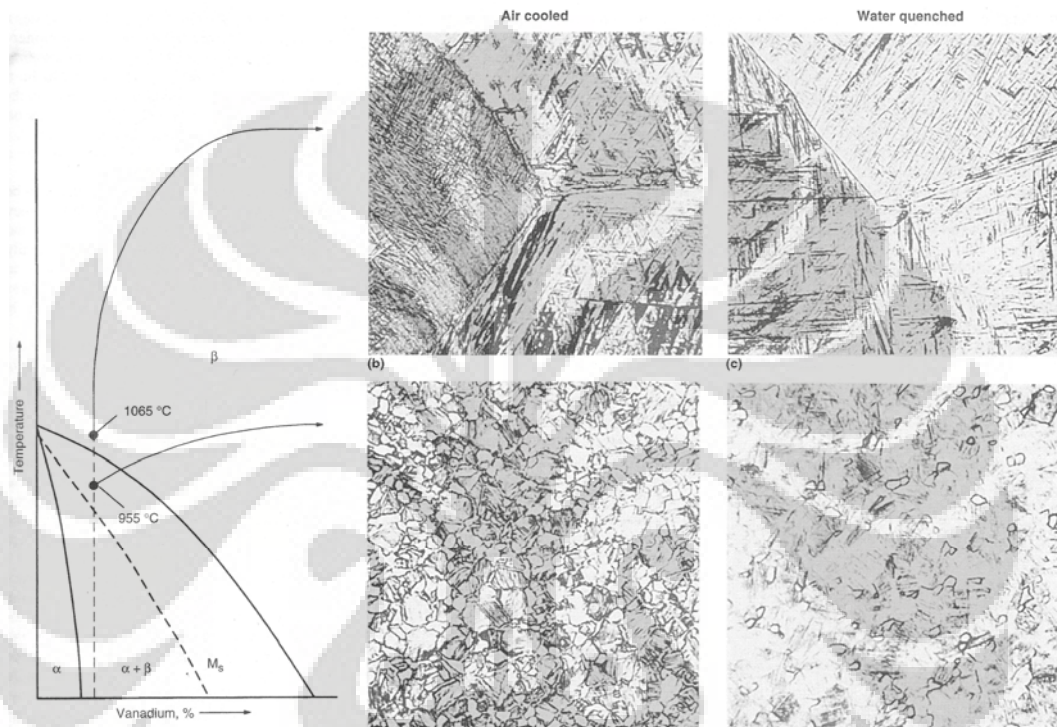
Gambar 3.5 Sampel Hasil Homogenisasi

3.5 Pengerjaan Tempa

Pengerjaan proses tempa menggunakan mesin *forging* kapasitas gaya tekan 160 ton. Tujuan pengerjaan tempa pada penelitian ini adalah untuk menghilangkan mikro porositas akibat penyusutan, sedemikian hingga sampel hasil *forging*, kekerasannya dapat diuji untuk mendapatkan nilai yang tepat.

Pengerjaan tempa merupakan pengerjaan panas (*hot work*), dengan pemanasan awal pada suhu 1100°C , selama 30 menit, kemudian ditempa (*open die forging*). Pemanasan awal perlu dilakukan karena pada Titanium paduan Ti-Al-Mo maupun

Ti-Al-Nb terdapat fasa alfa (kisi kristal hexagonal) yang mampu bentuknya kurang baik, oleh karena itu material dibawa ke fasa beta (kisi kristal kubik) agar mudah untuk dibentuk^[3,4]. Gambar 3.6 merupakan gambaran pengaruh temperatur dan prosentase kandungan vanadium terhadap fasa yang terbentuk. Fasa yang terbentuk adalah fasa alfa (putih/terang) dan fasa beta (hitam/gelap)^[3,4].



Gambar 3.6 Pengaruh Prosentase Kandungan Unsur Paduan Dan Temeperatur Terhadap Pembentukan Fasa^[3,4]

Gambar 3.6, selanjutnya akan digunakan sebagai acuan dalam proses perlakuan panas dalam penelitian. Penggunaan Gambar 3.6 sebagai acuan perlakuan panas dikarenakan bahwa dalam penelitian ini dilakukan substitusi logam Vanadium pada paduan Ti-Al dengan logam Molibdenum dan Niobium sebagai pengganti penstabil fasa beta.

Pada gambar 3.6 di atas tampak bahwa pada suhu 1100⁰C sudah terbentuk fasa beta, dan dengan pemanasan selama 30 menit diharapkan fasa alfa seluruhnya bertransformasi membentuk fasa beta. Mesin tempa dan sampel hasil tempa ditunjukkan pada Gambar 3.7 dan Gambar 3.8.



Gambar 3.7 Mesin Tempa



Gambar 3.8 Sampel Hasil Tempa

3.6 Proses Perlakuan Panas

Perlakuan panas terhadap paduan Ti-Al-Mo dan Ti-Al-Nb dilakukan pada suhu 1000°C, selama 30 menit, dengan maksud seluruh fasa alfa bertransformasi menjadi fasa beta. Selanjutnya pendinginan sampel di udara terbuka (kecepatan pendinginan relatif lambat) diharapkan terjadi transformasi sebagian fasa beta menjadi alfa, dan merupakan paduan Ti α - β , dimana fasa beta tetap terbentuk akibat kandungan masing-masing unsur Mo dan Nb. Gambar 2.4 adalah prosedur laku panas terhadap sampel.

3.7 Pengamatan Struktur Mikro

Sampel dari hasil laku panas diamati struktur mikronya dengan menggunakan mikroskop optik. Kemudian distribusi fasa beta yang terbentuk setelah penambahan masing unsur Mo dan Nb dihitung. Proses pengamatan sebaran distribusi fasa beta berdasarkan perhitungan jumlah butir^[10]. Metode yang digunakan adalah:

- **Metode Perbandingan**

Foto mikrostruktur bahan dengan perbesaran 100X dapat dibandingkan dengan grafik ASTM E112-63, dapat ditentukan besar butir. Nomor besar butir ditentukan oleh rumus ;

$$N = 2^{n-1} \dots\dots\dots(3.1)$$

Dimana N adalah jumlah butir per inch² dengan perbesaran 100x. Metode ini cocok untuk sampel dengan butir beraturan.

- **Metode Intercept (Heyne)**

Plastik transparan dengan grid (bergaris kotak-kotak) diletakkan di atas foto atau sampel. Sedangkan untuk grid yang digunakan didepan *screen* mempunyai 16, 25, 29, 64 atau 100 titik. Kemudian dihitung semua butir yang berpotongan dengan

satu atau dua garis, sedangkan butir yang hanya berpotongan pada akhir garis dianggap setengah. Metode ini cocok untuk butir-butir yang tidak beraturan. Prosentase jumlah butir dapat dihitung dengan membagi jumlah butir dengan jumlah titik/ grid yang digunakan dalam pengukuran lalu dikalikan 100%. Pesamaan matematis dari perhitungan ini adalah sebagai berikut:

$$P = \frac{pb + \frac{1}{2} px}{pt} \times 100\% \dots\dots\dots(3.2)$$

Dimana

- P = Prosentase jumlah butir
- pb = Jumlah butir yang berpotongan dengan satu atau dua garis
- px = Jumlah butir yang hanya berpotongan pada akhir garis
- pt = Jumlah titik / grid yang digunakan

• **Metode Planimetri**

Metode ini menggunakan lingkaran yang umumnya memiliki luas 5000 mm². Perbesaran dipilih sedemikian sehingga ada sedikitnya 75 butir yang berada di dalam lingkaran. Kemudian hitung jumlah total semua butir dalam lingkaran di tambah setengah dari jumlah butir yang berpotongan dengan lingkaran. Besar butir dihitung dengan mengalikan jumlah butir dengan pengali Jefferies (f) pada Tabel 3.2. Perlu diperhatikan bahwa ketiga mode di atas hanya merupakan besar butir pendekatan, sebab butir memiliki 3 dimensi bukan dua dimensi.

Tabel 3.3 Faktor Pengali Jefferies

Perbesaran	f
1	0,002
25	0,125
50	0,5
75	1,125
100	2,0
200	8,0
300	18,0
500	50,0
1000	200,0

3.8 Uji Komposisi

Uji komposisi digunakan untuk koreksi unsur-unsur padu yang mungkin tereduksi akibat pengerjaan peleburan. Uji komposisi, pada penelitian ini digunakan untuk memantau kondisi kandungan unsur paduan setelah dilakukan peleburan. Pengujian komposisi dilakukan dengan metode AAS. Kandungan unsur yang diuji hanya dipilih unsur-unsur utama yang memberikan pengaruh signifikan dalam paduan, yaitu Al, Mo, Nb.

3.9 Uji Kekerasan

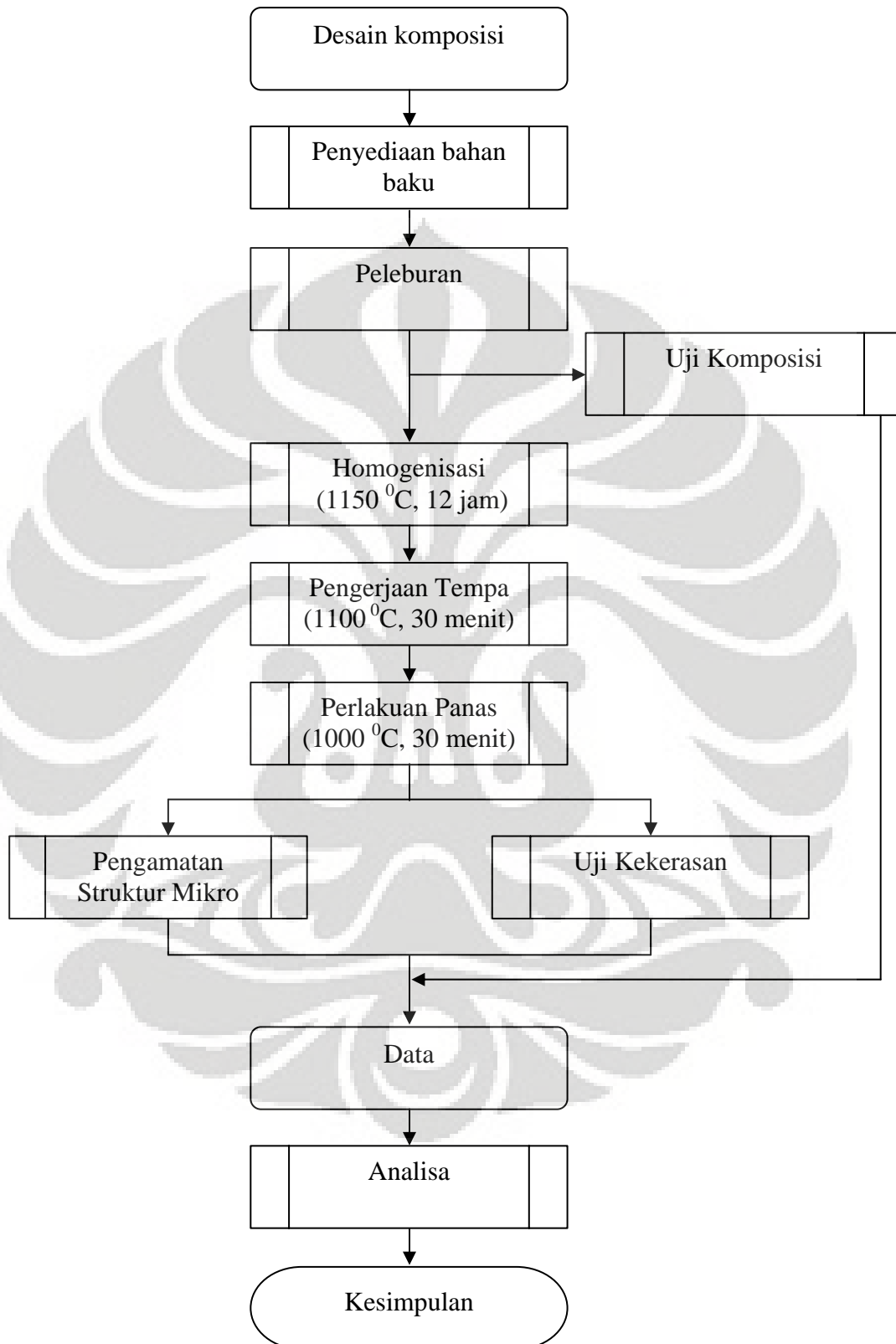
Terhadap logam pada umumnya, ada hubungan antara nilai kekerasan dengan kekuatannya, peningkatan kekerasan diikuti oleh bertambahnya kekuatan. Untuk mengetahui pengaruh pembentukan fasa beta setelah ditambahkan unsur padu Mo dan Nb, sampel setelah pengerjaan laku panas diuji kekerasannya (Vickers). Alat uji kekerasan ditunjukkan pada Gambar 3.9.

Proses pengujian logam kekerasan dapat diartikan juga sebagai kemampuan suatu bahan terhadap pembebanan dalam perubahan yang tetap. Harga kekerasan material dapat dianalisis dari besarnya beban yang diberikan terhadap luasan bidang yang menerima pembebanan. Pengujian kekerasan yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan indetektor piramida intan, dengan beban 200gF.



Gambar 3.9 Mesin Uji Kekerasan

3.10 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.10 Diagram Alir Penelitian

BAB 4

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Uji komposisi

Uji komposisi digunakan untuk koreksi unsur padu yang mungkin tereduksi akibat pengerjaan peleburan. Hasil uji komposisi dapat dilihat pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Hasil Uji Komposisi

Padaduan	Kode Sampel	Titanium	Alumunium	Molibdenum	Niobium
Ti-Al	al-a	bal	5.89	0.00	0.00
	al-b	bal	5.91	0.00	0.00
	al-c	bal	5.93	0.00	0.00
	al.i-a	bal	5.91	0.00	0.00
	al.i-b	bal	5.89	0.00	0.00
	al.i-c	bal	5.89	0.00	0.00
Ti-Al-Mo	2mo-a	bal	4.77	1.88	0.00
	2mo-b	bal	4.69	1.84	0.00
	2mo-c	bal	4.71	1.89	0.00
	4mo-a	bal	4.77	3.84	0.00
	4mo-b	bal	4.77	3.93	0.00
	4mo-c	bal	4.71	3.88	0.00
	6mo-a	bal	4.69	5.91	0.00
	6mo-c	bal	4.71	5.89	0.00
Ti-Al-Nb	1nb-a	bal	4.89	0.00	0.96
	1nb-b	bal	4.01	0.00	0.92
	1nb-c	bal	4.91	0.00	0.89
	4nb-a	bal	4.89	0.00	3.94
	4nb-b	bal	4.77	0.00	3.89
	4nb-c	bal	4.77	0.00	3.90
	7nb-a	bal	4.89	0.00	6.93
	7nb-b	bal	4.77	0.00	6.87
	7nb-c	bal	4.88	0.00	6.93
	1nb.i-a	bal	4.89	0.00	0.96
	1nb.i-b	bal	4.88	0.00	0.92
	1nb.i-c	bal	4.87	0.00	0.89
	4nb.i-a	bal	4.88	0.00	3.94
	4nb.i-b	bal	4.87	0.00	3.89
	4nb.i-c	bal	4.89	0.00	3.90
	7nb.i-a	bal	4.89	0.00	6.93
	7nb.i-b	bal	4.88	0.00	6.87
	7nb.i-c	bal	4.89	0.00	6.93

Kandungan unsur yang di uji hanya dipilih unsur-unsur utama yang memberikan pengaruh signifikan dalam paduan. Dari data yang ditampilkan tampak bahwa kandungan unsur Al mengalami penurunan prosentase kandungan. Penurunan ini semakin besar ketika ditambahkan unsur Mo dan Nb, di karenakan titik didih Al (2519°C) lebih rendah bila dibandingkan dengan titik lebur Mo (2623°C) dan Nb (2477°C), sehingga unsur Al berkurang, karena terjadi penguapan cairan Al.

4.2 Pengaruh Alumunium Dalam Paduan Titanium

Al di dalam Ti dapat meningkatkan sifat mekanik kekerasan dan kekuatan, jika dibandingkan dengan logam murninya. Hasil uji keras menunjukkan bahwa Ti murni dengan kekerasan 70-74 HRB atau 130-135 HV mengalami peningkatan nilai kekerasan menjadi 355.89 HV pada suhu 1000°C dan 410.19 HV pada suhu 1100°C dengan penambahan Al, seperti yang tampak pada Tabel 4.2.

4.2.1 Pengaruh Alumunium Terhadap Kekerasan

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan dengan metode vickers diperoleh nilai kekerasan paduan Ti-Al. Nilai kekerasan tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Nilai Kekerasan Paduan Ti-Al

Kode	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Rata-Rata Titik	Rata-Rata Sampel	Ket
al-a	417.60	330.50	320.80	356.30	355.89	T.1000
al-b	410.20	332.10	321.30	354.53		T.1000
al-c	414.10	337.40	319.00	356.83		T.1000
al.i-a	432.00	426.20	370.60	409.60	410.19	T.1100
al.i-b	420.60	414.90	398.00	411.17		T.1100
al.i-c	425.10	402.60	401.70	409.80		T.1100

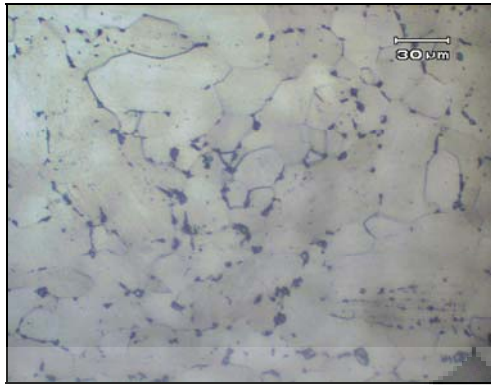
Peningkatan nilai kekerasan ini disebabkan karena pembentukan fasa intermetalik Ti-Al yang keras dan getas di dalam matrik logam Ti. Fakta yang menunjukkan pembentukan fasa intermetalik dapat dilihat dari hasil pengamatan struktur

mikronya, adanya bintik-bintik dalam matrik Ti-Al seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 4.1 dan 4.2

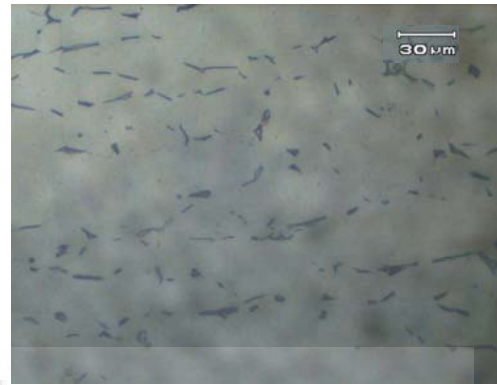
Perbedaan nilai kekerasan yang dikarenakan perbedaan suhu perlakuan panas disebabkan karena fasa intermetalik yang terdekomposisi, dan pembentukan fasa intermetalik balik selama pendinginan lambat di udara. Pada suhu perlakuan panas 1000°C , tidak semua fasa intermetalik Ti-Al terdekomposisi. Akibatnya pembentukan balik fasa intermetalik terdistribusi rendah. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 sebaran fasa intermetalik Ti-Al terdistribusi rendah. Hal ini berbeda dengan peningkatan suhu laku panas pada 1100°C . Fasa intermetalik Ti-Al seluruhnya terdekomposisi, kemudian terbentuk kembali selama pendinginan di udara. Pembentukan fasa intermetalik dari suhu 1100°C tersebar dan terdistribusi lebih tinggi dari pada pemanasan 1000°C . Fakta ini ditunjukkan pada foto struktur mikro pada Gambar 4.2.

4.2.2 Pengaruh Kandungan Aluminium Terhadap Pembentukan Tipe Struktur Mikro

Al dalam paduan titanium berfungsi sebagai penstabil fasa alfa. Hal ini ditunjukkan dari hasil pengamatan struktur mikro setelah laku panas pada suhu tinggi (1000°C dan 1100°C). Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1, pemanasan sampel pada suhu 1000°C terbentuk butir-butir fasa alfa. Pemanasan pada suhu yang lebih tinggi (1100°C) fasa alfa tetap terbentuk, dengan struktur mikro fasa alfa berbentuk jarum, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2.



(a)



(b)



(c)

Keterangan:

- a. Sampel al-a
- b. Sampel al-b
- c. Sampel al-c

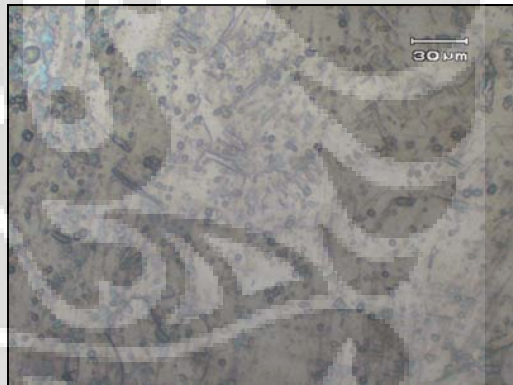
Etsa HF 3%

Fasa α berwarna hitam/ gelap
Fasa β berwarna putih/ terang

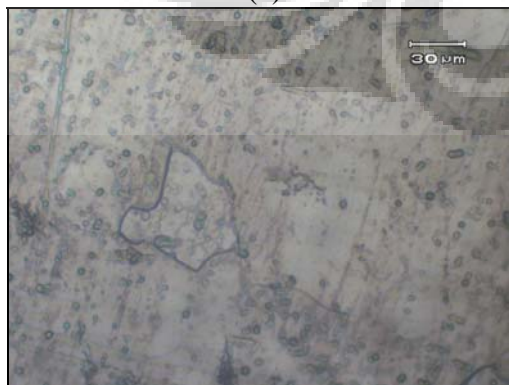
Gambar 4.1 Foto Struktur Mikro Ti-Al Laku Panas 1000⁰C



(a)



(b)



(c)

Keterangan:

- a. Sampel al.i-a
- b. Sampel al.i-b
- c. Sampel al.i-c

Etsa HF 3%

Fasa α berwarna hitam/ gelap
Fasa β berwarna putih/ terang

Gambar 4.2 Foto Struktur Mikro Ti-Al Laku Panas 1100⁰C

4.3 Pengaruh kandungan Molybdenum Dalam Paduan Titanium

4.3.1 Pengaruh Molybdenum Terhadap Kekerasan

Hasil pengujian kekerasan, setelah ditambahkan Mo yang divariasikan dari 2%-6% ditunjukkan pada Tabel 4.3. Sampel 2mo memiliki kandungan Mo sebesar 1%, 4mo memiliki kandungan 4% Mo dan 6mo memiliki kandungan 6% Mo.

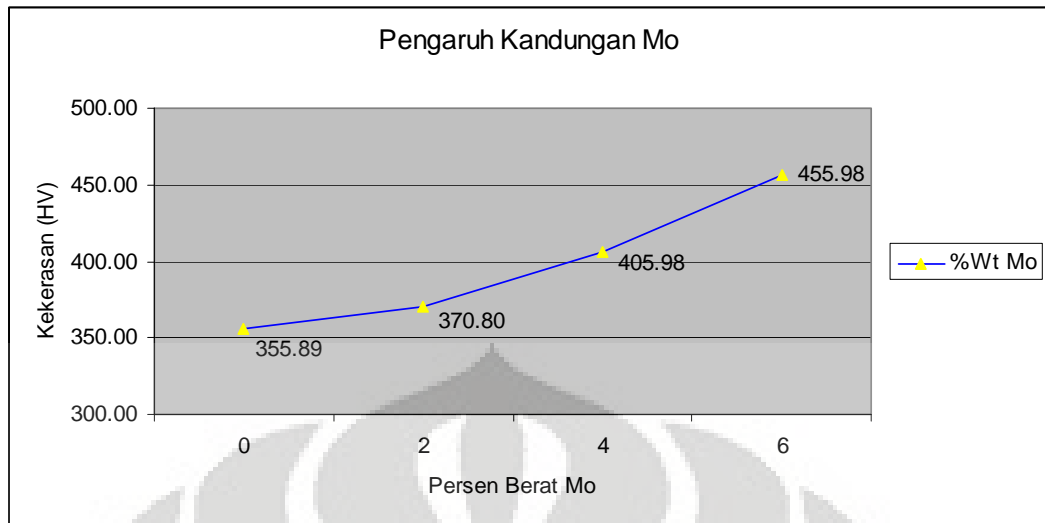
Tabel 4.3 Nilai Kekerasan Paduan Ti-Al-Mo

Kode	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Rata-Rata Titik	Rata-Rata Sampel	Ket
2mo-a	385.90	362.20	362.20	370.10	370.80	T.1000
2mo-b	388.70	358.90	361.10	369.57		T.1000
2mo-c	385.10	363.10	370.00	372.73		T.1000
4mo-a	508.80	355.50	355.50	406.60	405.98	T.1000
4mo-b	497.70	357.30	350.80	401.93		T.1000
4mo-c	512.10	354.90	361.20	409.40		T.1000
6mo-a	528.10	426.20	412.10	455.47	455.97	T.1000
6mo-b	527.60	430.00	421.30	459.63		T.1000
6mo-c	520.80	413.90	423.70	452.80		T.1000

Hubungan antara kandungan Mo dan kekerasan dari Tabel 4.4 di bawah menghasilkan grafik seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.3. Pada Gambar 4.3 menghasilkan kurva dimana peningkatan kandungan Mo diikuti dengan nilai kekerasannya. Hal ini berarti kandungan Mo berpengaruh terhadap peningkatan kekuatan paduan Ti-6% Al-Mo.

Tabel 4.4 Nilai Kekerasan Ti-Al dan Ti-Al-Mo

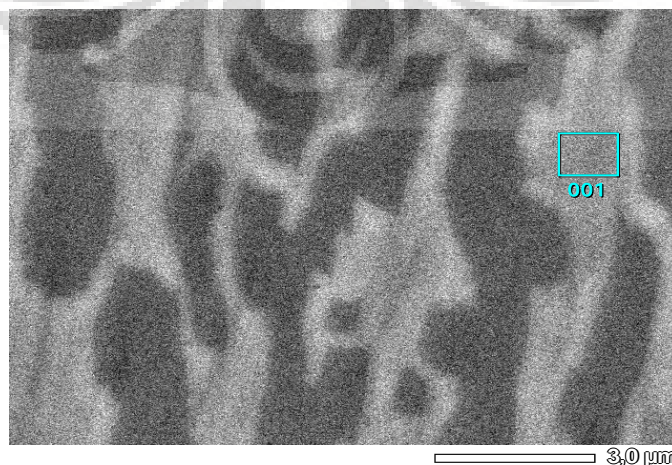
Kode sampel	Nilai kekerasan vickres
al	355.89
2mo	370.80
4mo	405.98
6mo	455.98

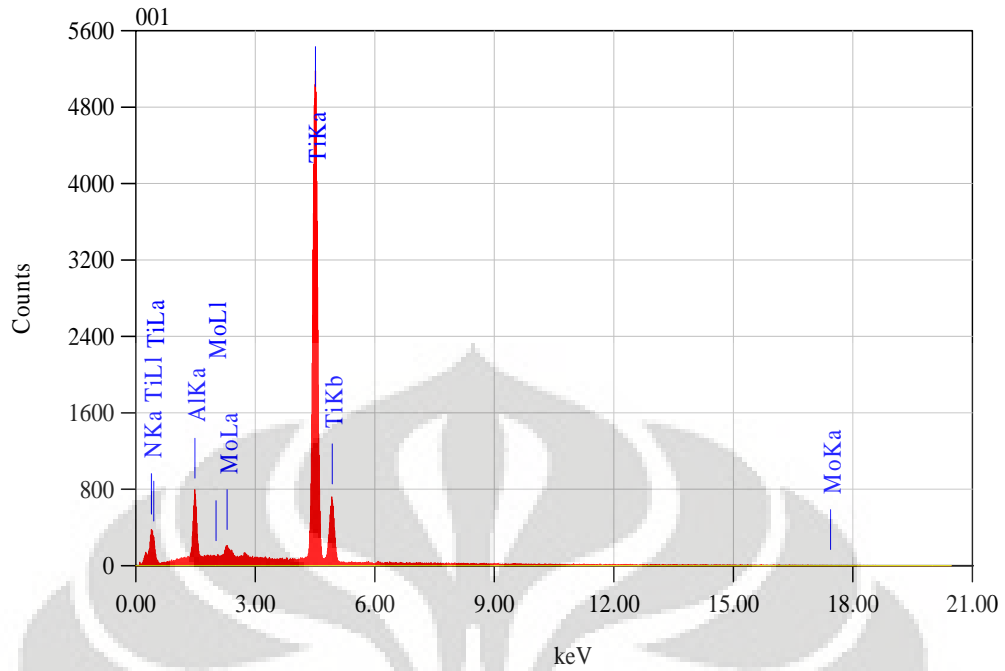


Gambar 4.3 Grafik Pengaruh Mo Terhadap Kekerasan

Paduan titanium tipe alfa dengan Al sebagai unsur penstabilnya mempunyai nilai kekerasan yang lebih rendah 355.89 HV bila dibandingkan dengan paduan titanium tipe alfa-beta. Paduan tipe alfa-beta juga mengalami peningkatan nilai kekerasan bila kandungan unsur pembentuk fasa beta yaitu Mo diperbanyak. Pada kandungan unsur sebanyak 2% nilai kekerasannya adalah 370.80 HV, kemudian bila ditambahkan prosentasenya menjadi 4% nilai kekerasannya menjadi 405.98 HV, begitu juga bila dinaikkan lagi menjadi 6%, nilai kekerasannya bertambah besar menjadi 455.98 HV.

Peningkatan nilai kekerasan ini diakibatkan karena adanya endapan Al-Mo pada fasa beta. Hal ini dapat dilihat dari hasil pengujian SEM EDAX pada Gambar 4.4 dan 4.5 di bawah.

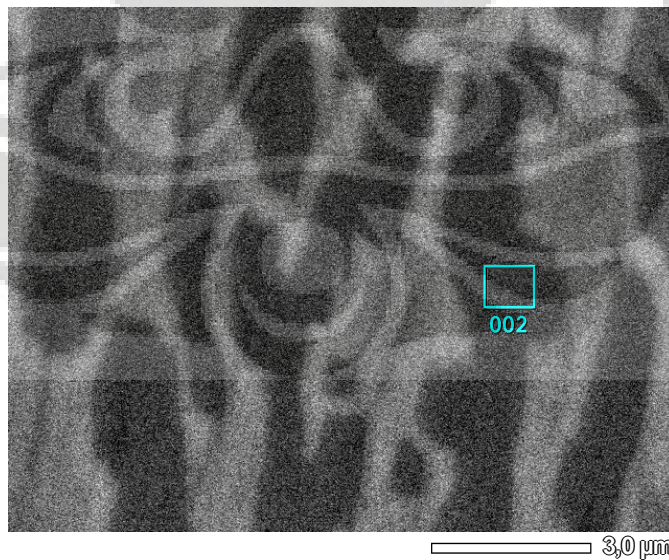


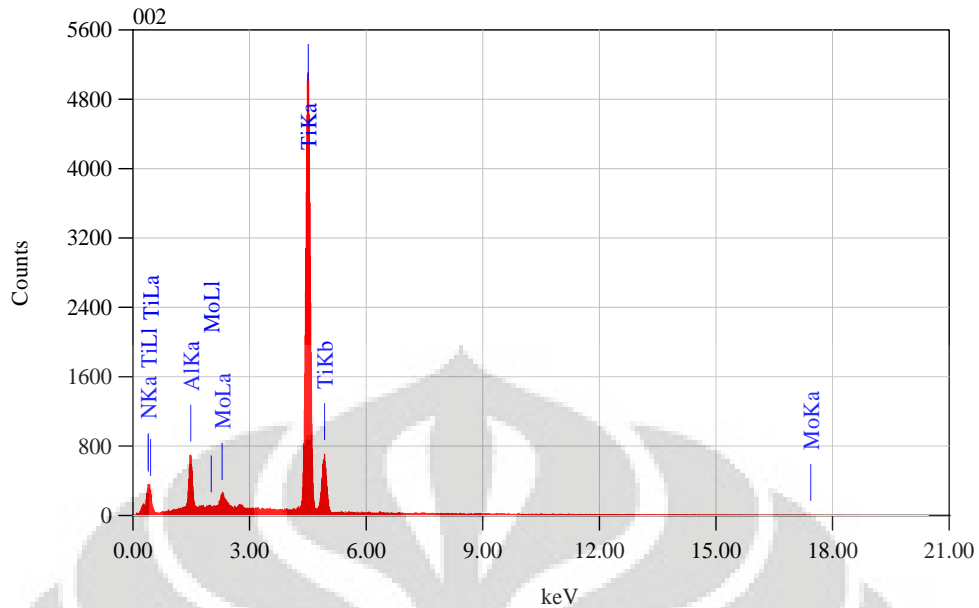


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.3809

Element	(keV)	Mass%	Error%	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
N K	0.392	6.03	0.77	17.50				14.2794
Al K	1.486	5.66	0.50	8.53				3.2711
Ti K	4.508	85.99	0.70	72.98				80.5758
Mo L	2.293	2.33	1.08	0.99				1.8737
Total		100.00		100.00				

Gambar 4.4 Hasil Pengamatan SEM EDAX paduan Ti-6Al-4%Mo pada fasa α .





ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
 Fitting Coefficient : 0.3649

Element	(keV)	Mass%	Error%	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
N K	0.392	6.16	0.74	17.97				14.2212
Al K	1.486	5.12	0.47	7.75				2.9665
Ti K	4.508	85.47	0.66	72.90				80.1791
Mo L	2.293	3.25	1.01	1.38				2.6332
Total		100.00		100.00				

Gambar 4.5 Hasil pengamatan SEM EDAX paduan Ti-6Al-4%Mo pada fasa β

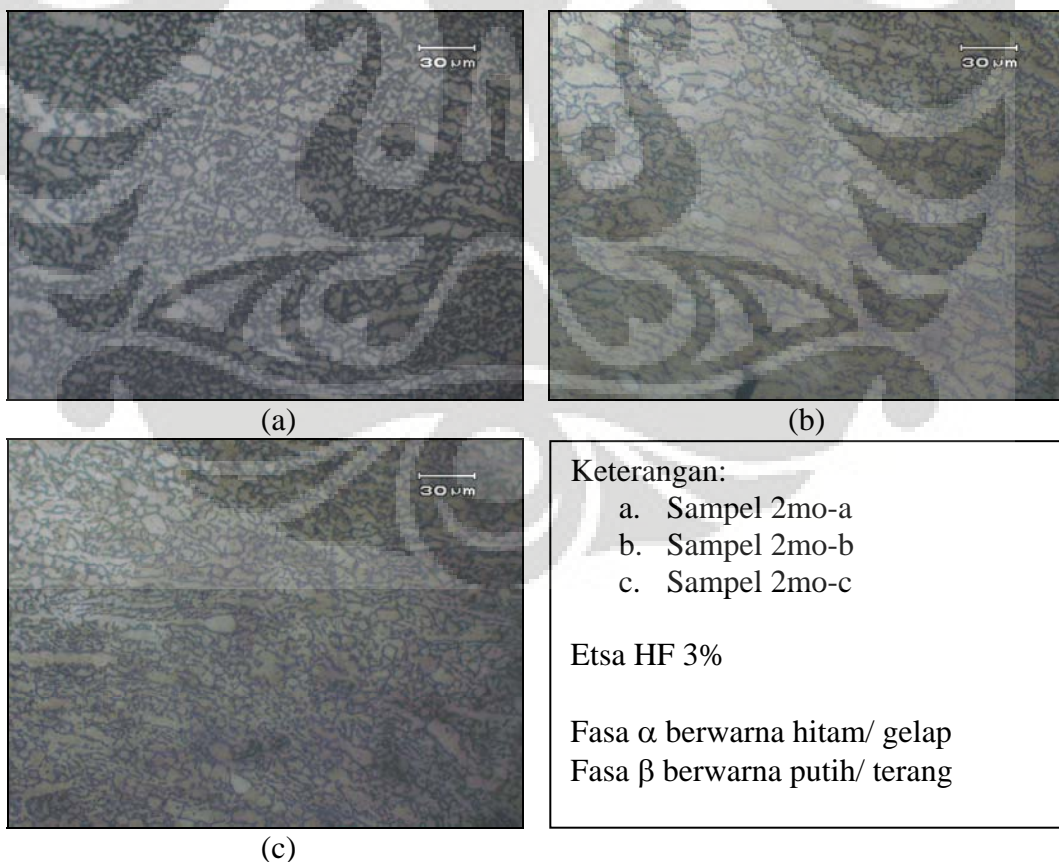
Hasil pengamatan SEM paduan Ti-Al-Mo pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 menunjukkan bahwa tampak adanya fasa α (warna putih) dan β (warna hitam). Hasil analisa komposisi kimia mikro ditunjukkan adanya perbedaan kandungan Mo. Kandungan Mo di dalam fasa β (3,25%) lebih tinggi dari pada kandungan Mo di dalam fasa α (2,33%). Jadi kekerasan fasa β disebabkan karena adanya konsentrasi endapan kandungan Mo yang lebih tinggi.

4.3.2 Pengaruh Molybdenum Struktur Mikro

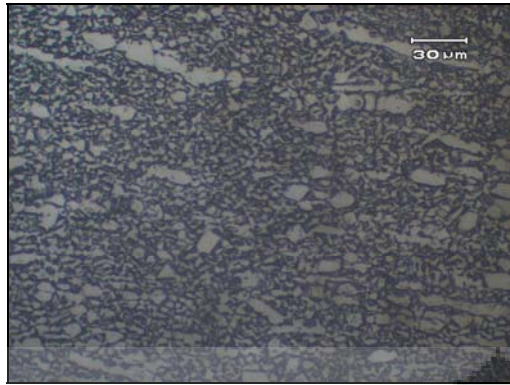
Hasil pengamatan struktur mikro pengaruh kandungan Mo ditunjukkan pada Gambar 4.6, Gambar 4.7, Gambar 4.8. Struktur mikro Ti-6% Al-Mo terdiri dari 2 fasa yang terbentuk yaitu fasa alfa (warna putih) dan fasa beta (warna hitam), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6 pada bab sebelumnya. Distribusi fasa beta yang terbentuk tergantung pada nilai kandungan Mo. Peningkatan kandungan Mo diikuti dengan pembentukan fasa beta yang hebat. Seperti yang ditunjukkan

pada Gambar 4.6, kandungan Mo 2% terbentuk fasa beta dalam matrik fasa alfa. Peningkatan Mo lebih tinggi (4%), fasa beta yang terbentuk lebih banyak seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7. Selanjutnya kandungan Mo ditingkatkan (6%), matriknya berubah menjadi fasa beta, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8. Dari hasil pengamatan struktur mikro ini menunjukkan bahwa unsur Mo bertindak sebagai pembentuk fasa beta. Dari hasil pengamatan struktur mikro yang dikaitkan dengan hasil uji kekerasan menunjukkan bahwa pembentukan fasa beta diikuti dengan peningkatan kekerasan, hal ini berarti fasa beta mempunyai sifat lebih keras dari pada fasa alfa dalam paduan titanium tipe α - β .

Selanjutnya bagaimana menentukan kandungan Mo dalam aplikasinya yang dipandang dari aspek sifat mekanik. Seperti logam pada umumnya peningkatan kekerasan diikuti dengan peningkatan kekuatan, tetapi logam menjadi tidak ulet (elongasi rendah). Jadi jumlah kandungan yang dipilih adalah paduan Ti fasa duplex, dimana fasa beta menduduki luasan sekitar 50%.



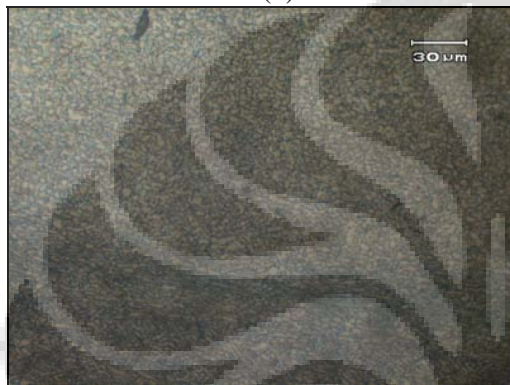
Gambar 4.6 Foto Struktur Mikro Ti-Al-2% Mo



(a)



(b)



(c)

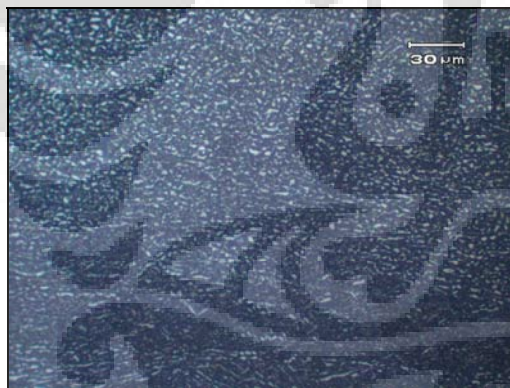
Keterangan:

- a. Sampel 4mo-a
- b. Sampel 4mo-b
- c. Sampel 4mo-c

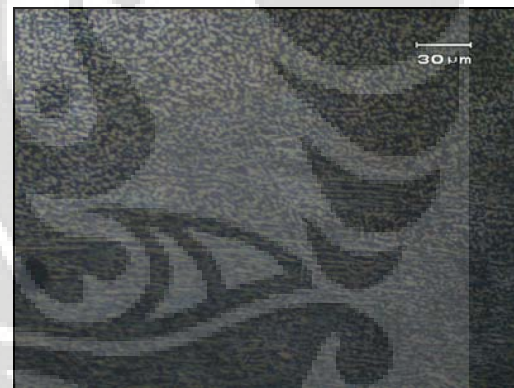
Etsa HF 3%

Fasa α berwarna hitam/ gelap
Fasa β berwarna putih/ terang

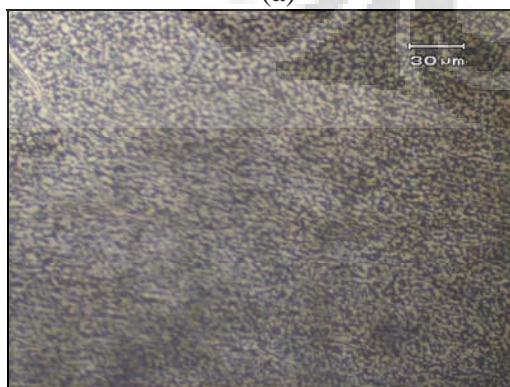
Gambar 4.7 Foto Struktur Mikro Ti-Al-4% Mo



(a)



(b)



(c)

Keterangan:

- a. Sampel 6mo-a
- b. Sampel 6mo-b
- c. Sampel 6mo-c

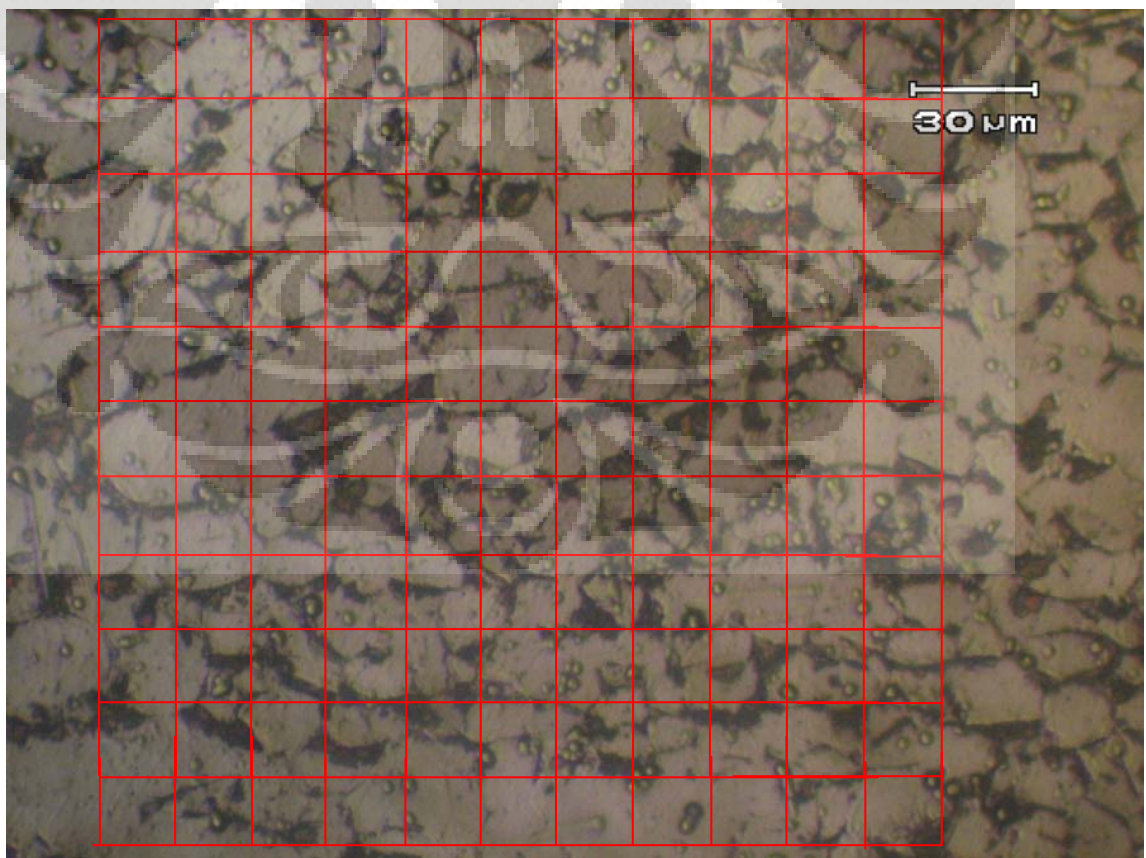
Etsa HF 3%

Fasa α berwarna hitam/ gelap
Fasa β berwarna putih/ terang

Gambar 4.8 Foto Struktur Mikro Ti-Al-6% Mo

4.4 Hubungan Antara Banyak Butir Fasa Beta Dengan Kandungan Unsur Pemasu

Banyaknya prosentase fasa beta yang terbentuk didalam paduan dapat dihitung berdasarkan metoda intercept, yaitu perhitungan banyak butir pada luas bidang dari pengamatan struktur mikro. Hasil prosentase fasa beta dan kandungan unsur pemasu ditunjukkan pada Tabel 4.5. Hubungan antara prosentase fasa beta dengan kandungan Mo ditunjukkan pada Gambar 4.10, hubungan antara prosentase fasa beta dengan kandungan Nb ditunjukkan pada Gambar 4.11 untuk perlakuan panas 1000⁰C dan ditunjukkan pada Gambar 4.12 untuk perlakuan panas 1100⁰C. Ada hubungan antara peningkatan kandungan Mo dengan prosentase fasa beta, dimana peningkatan kandungan Mo diikuti dengan peningkatan prosentase fasa beta. Begitu juga dengan unsur Nb. Dari hasil perhitungan banyaknya prosentase fasa beta ini memperkuat fakta bahwa unsur Mo dan Nb mempunyai fungsi sebagai pembentuk fasa beta.



Gambar 4.9 Contoh Perhitungan Prosentase Fasa

Gambar 4.9 di atas mengilustrasikan perhitungan fasa menggunakan metode intercept dengan grid 100, dari perhitungan didapatkan total titik sebanyak 25 buah pada fasa beta. Menggunakan persamaan 3.2 dapat dihitung persentasenya menjadi 25 %, jadi pada paduan tersebut terdiri dari 25% fasa beta dan 75 % fasa alfa. Berikut adalah contoh penghitungannya dan pada Tabel 4.5 ditampilkan prosentase fasa beta dari seluruh sampel penelitian.

$$P = \frac{pb + \frac{1}{2} px}{pt} \times 100\%$$

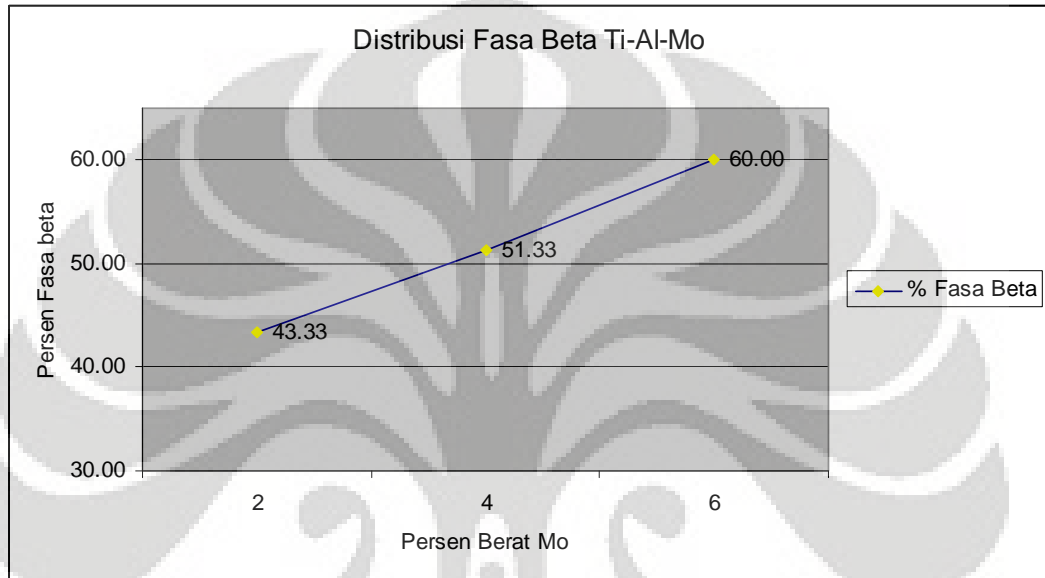
$$P = \frac{25}{100} \times 100\%$$

$$P = 25 \%$$

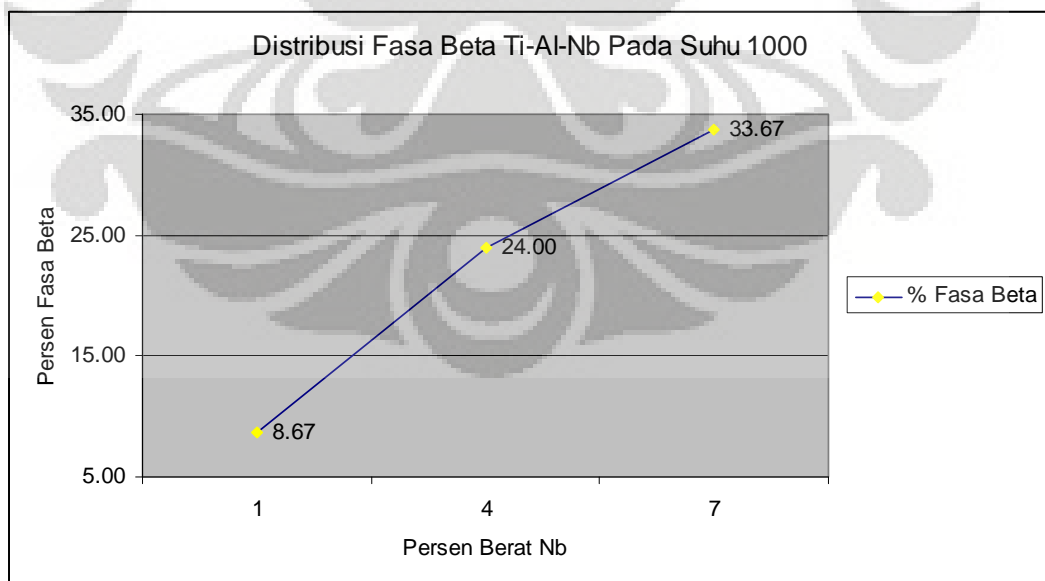
Tabel 4.5 Prosentase Fasa Beta Dalam Sampel Penelitian

Padaduan	Kode Sampel	Prosentase Fasa Beta (%)	Rata-rata (%)
Ti-Al	al-a	0	0
	al-b	0	
	al-c	0	
	al.i-a	0	0
	al.i-b	0	
	al.i-c	0	
Ti-Al-Mo	2mo-a	44	43.33
	2mo-b	42	
	2mo-c	44	
	4mo-a	48	51.33
	4mo-b	52	
	4mo-c	54	
	6mo-a	60	60.00
	6mo-b	58	
	6mo-c	62	
Ti-Al-Nb	1nb-a	9	8.67
	1nb-b	8	
	1nb-c	9	
	4nb-a	27	24.00
	4nb-b	23	
	4nb-c	22	
	7nb-a	37	33.67
	7nb-b	31	
	7nb-c	33	

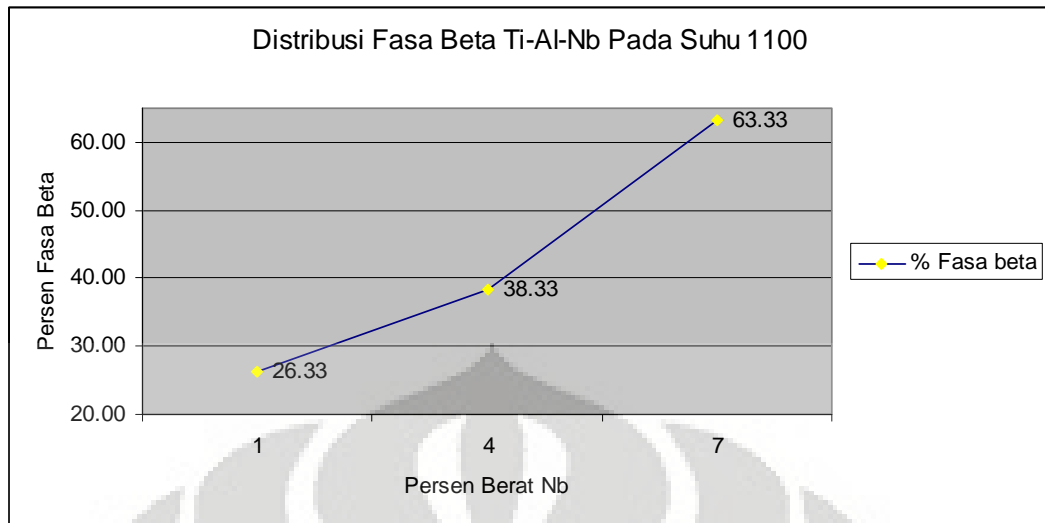
1nb.i-a	25	26.33
1nb.i-b	27	
1nb.i-c	27	
4nb.i-a	40	38.33
4nb.i-b	37	
4nb.i-c	38	
7nb.i-a	63	63.33
7nb.i-b	65	
7nb.i-c	62	



Gambar 4.10 Prosentae Kandungan Mo Dalam Paduan



Gambar 4.11 Prosentae Kandungan Nb Dalam Paduan, Perlakuan Panas 1000⁰C



Gambar 4.12 Prosentase Kandungan Nb Dalam Paduan, Perlakuan Panas 1100⁰C

4.5 Pengaruh Niobium Dalam Paduan Titanium

4.5.1 Pengaruh Niobium Terhadap Kekerasan

Tabel 4.6 menampilkan nilai kekerasan paduan Ti-Al-Nb pada variasi prosentase kandungan unsur Niobium. Sampel 1nb memiliki kandungan Nb sebesar 1%, 4nb memiliki kandungan Nb sebesar 4% dan 7nb memiliki kandungan 7% Nb.

Tabel 4.6 Nilai Kekerasan Paduan Ti-Al-Nb Pada Suhu 1000⁰C

Kode	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Rata-Rata Titik	Rata-Rata Sampel	Ket
1nb-a	366.80	351.10	320.80	346.23	343.16	T.1000
1nb-b	374.10	356.60	314.00	348.23		T.1000
1nb-c	358.80	311.60	334.60	335.00		T.1000
4nb-a	404.00	330.50	360.20	364.90	361.09	T.1000
4nb-b	387.60	326.80	342.10	352.17		T.1000
4nb-c	405.20	382.50	310.90	366.20		T.1000
7nb-a	441.00	351.10	362.20	384.77	386.67	T.1000
7nb-b	438.80	354.70	365.50	386.33		T.1000
7nb-c	443.20	357.40	366.10	388.90		T.1000

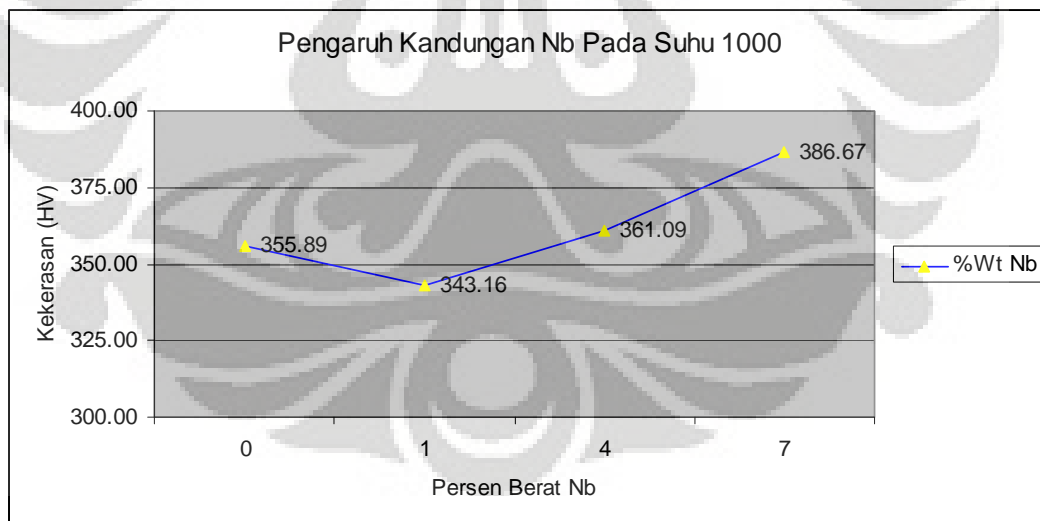
Hubungan antara kandungan Nb dan kekerasan dari Tabel 4.7 di bawah menghasilkan grafik seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.13. Pada Gambar 4.13 menghasilkan kurva dimana peningkatan kandungan Nb diikuti dengan nilai

kekerasannya, namun mengalami penurunan bila dibandingkan dengan kekerasan paduan Ti-Al. Hal ini berarti kandungan Nb berpengaruh terhadap peningkatan kekuatan paduan Ti-6%Al-Nb, namun mengalami penurunan kekerasan ketika dibandingkan dengan paduan Ti-Al.

Pada Tabel 4.7 dan Gambar 4.13 tampak bahwa penambahan Nb memberi efek penurunan nilai kekerasan paduan pada kandungan 1% Nb. Penurunan nilai kekerasan ini perlu untuk dilakukan sinkronisasi dengan distribusi fasa yang terbentuk. Distribusi fasa yang terbentuk pada paduan Ti-Al-Nb, menunjukkan bahwa fasa beta yang terbentuk tidak cukup banyak untuk dapat meningkatkan nilai kekerasan. Distribusi fasa paduan dapat dilihat pada Gambar 4.17.

Tabel 4.7 Nilai Kekerasan Ti-Al dan Ti-Al-Nb

Kode sampel	Nilai kekerasan vickres
Al	355.89
1nb	343.16
4nb	361.09
7nb	386.67



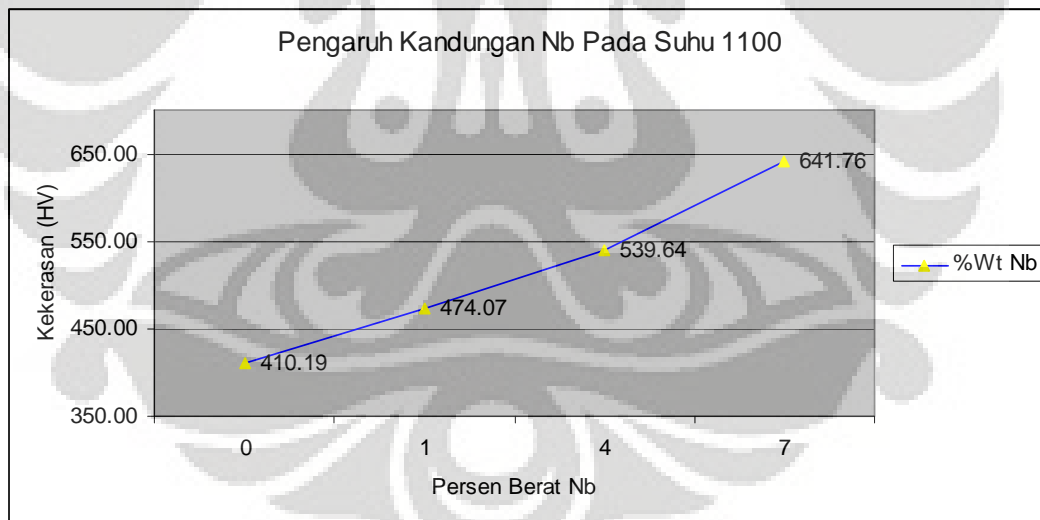
Gambar 4.13 Grafik Pengaruh Nb Terhadap Kekerasan

Distribusi fasa beta yang terbentuk pada paduan Ti-Al-1% Nb relatif sedikit sehingga menurunkan nilai kekerasan bila dibandingkan dengan paduan Ti-Al yang merupakan paduan tipe alfa. Fenomena ini dapat diatasi dengan melakukan

pengerjaan perlakuan panas pada suhu yang lebih tinggi yaitu pada suhu 1100⁰C. Tabel 4.8 dan Gambar 4.14 di bawah menampilkan nilai kekerasan paduan setelah perlakuan panas 1100⁰C. Pengerjaan perlakuan panas juga dilakukan pada semua sampel paduan Ti-Al-Nb untuk memperoleh perbandingan data yang lebih baik.

Tabel 4.8 Nilai Kekerasan Paduan Ti-Al-Nb Pada Suhu 1100⁰C

Kode	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Rata-Rata Titik	Rata-Rata Sampel	Ket
al.i-a	432.00	426.20	370.60	409.60	410.19	T.1100
al.i-b	420.60	414.90	398.00	411.17		T.1100
al.i-c	425.10	402.60	401.70	409.80		T.1100
1nb.i-a	503.40	456.60	463.10	474.37	474.07	T.1100
1nb.i-b	500.90	444.60	473.70	473.07		T.1100
1nb.i-c	510.30	458.20	455.80	474.77		T.1100
4nb.i-a	570.40	520.10	526.20	538.90	539.64	T.1100
4nb.i-b	559.60	513.80	532.60	535.33		T.1100
4nb.i-c	573.40	533.30	527.40	544.70		T.1100
7nb.i-a	643.90	643.90	628.10	638.63	641.76	T.1100
7nb.i-b	656.30	654.10	633.90	648.10		T.1100
7nb.i-c	631.90	651.60	632.10	638.53		T.1100

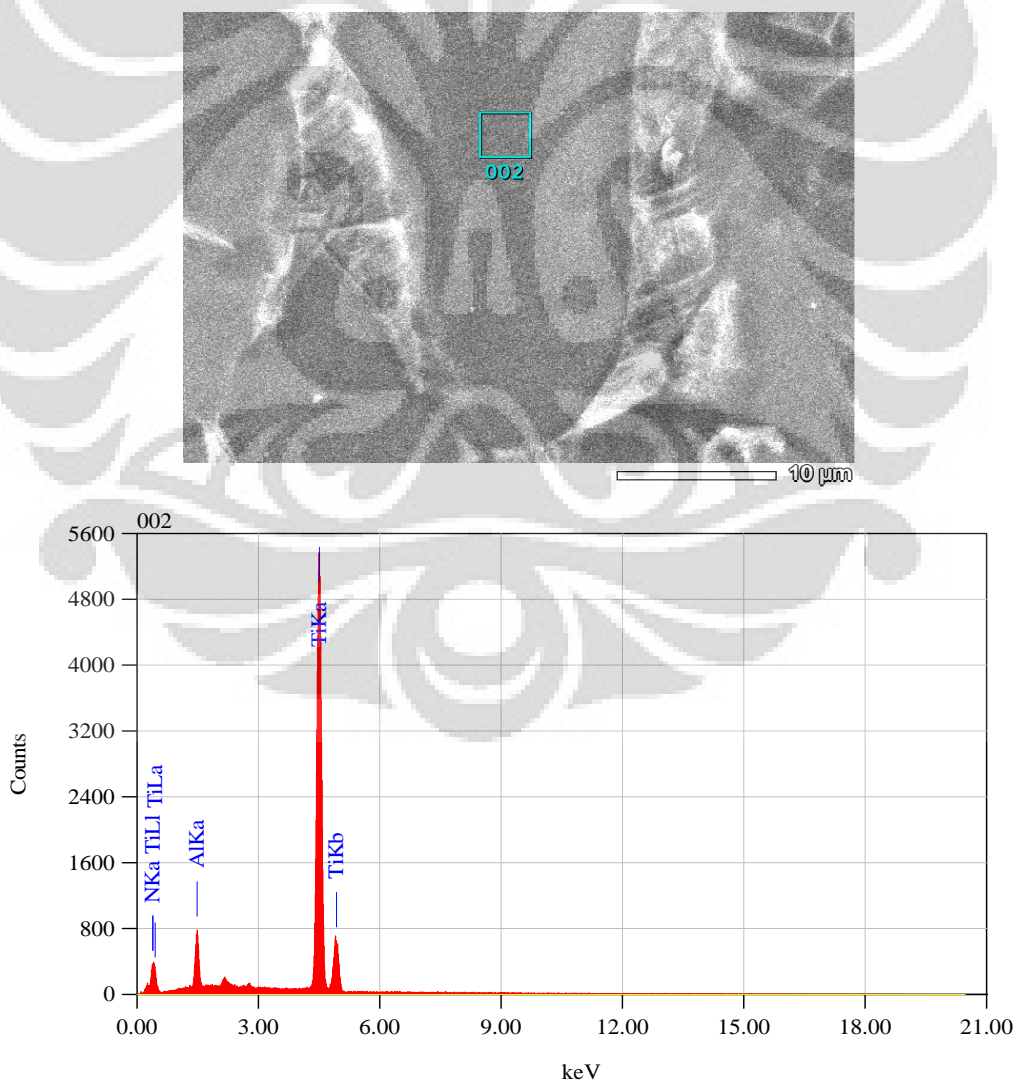


Gambar 4.14 Grafik Pengaruh Nb Terhadap Kekerasan Pada Suhu 1100⁰C

Pada Gambar 4.12 menghasilkan kurva dimana peningkatan kandungan Nb diikuti dengan nilai kekerasannya, begitu juga bila dibandingkan dengann kekerasan paduan Ti-Al. Hal ini berarti kandungan Nb berpengaruh terhadap peningkatan kekuatan paduan Ti-6% Al-Nb.

Merujuk pada kedua perlakuan panas yaitu pada suhu 1000⁰C dan 1100⁰C, maka benar bahwa kenaikan suhu pengerjaan perlakuan panas dapat meningkatkan nilai kekerasan. Mekanisme yang terjadi adalah dengan naiknya suhu pengerjaan seluruh fasa alfa bertransformasi menjadi fasa beta. Pada saat didinginkan lambat di udara sebagian fasa beta bertransformasi menjadi fasa alfa dan sebagian yang lain tetap membentuk fasa beta. Fenomena sampel 1nb, terjadi berdasarkan mekanisme pembentukan fasa beta yang belum terbentuk secara utuh pada suhu 1000⁰C sehingga fasa yang bertransformasi kembali ke fasa alfa lebih banyak.

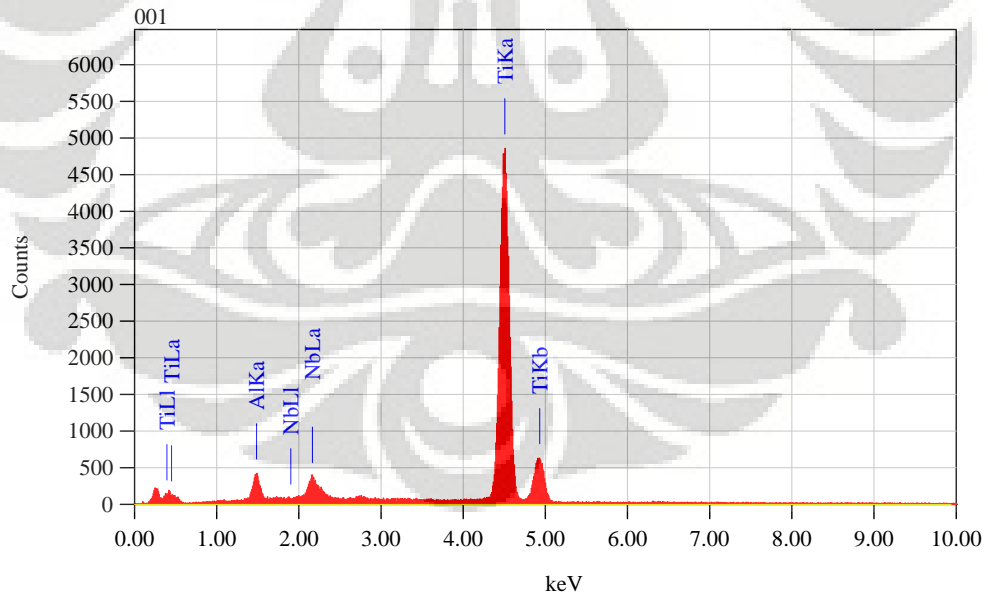
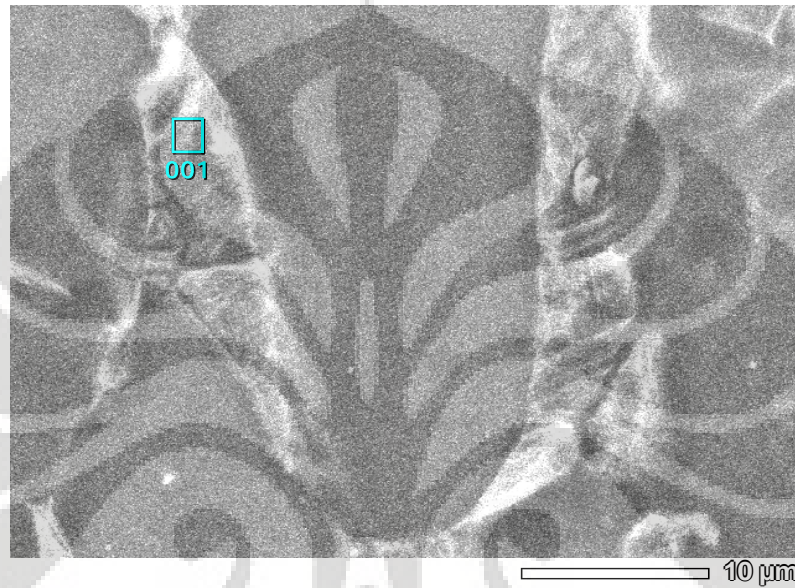
Peningkatan nilai kekerasan paduan Nb sama halnya dengan paduan Mo, diakibatkan karena adanya endapan Al-Nb pada fasa beta. Hal ini dapat dilihat dari hasil pengujian SEM EDAX pada Gambar 4.15 dan 4.16 di bawah.



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.3649

Element	(keV)	Mass%	Error%	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
N K	0.392	6.31	0.68	18.03				16.0649
Al K	1.486	5.64	0.49	8.37				3.1615
Ti K	4.508	88.05	0.68	73.60				80.7736
Total		100.00		100.00				

Gambar 4.15 Hasil SEM EDAX paduan Ti-6%Al-7%Nb pada fasa α



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.3803

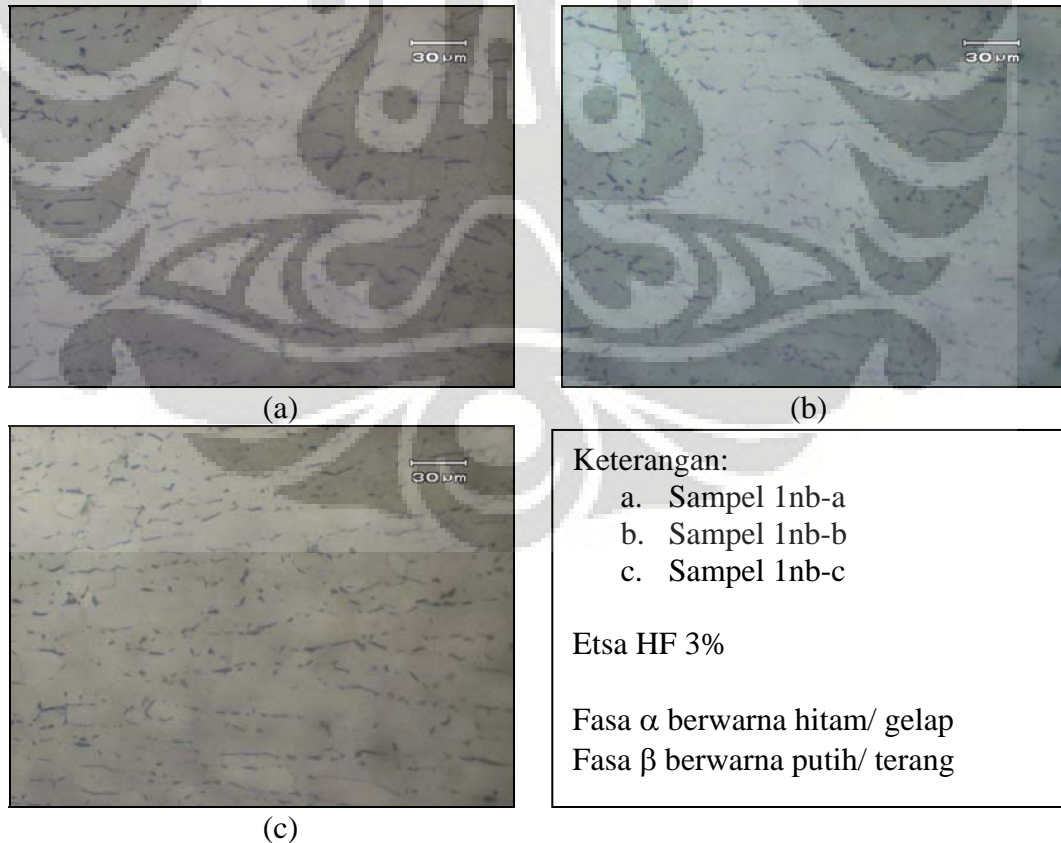
Element	(keV)	Mass%	Error%	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
Al K	1.486	3.19	0.52	5.70				2.0035
Ti K	4.508	90.56	0.72	91.06				92.5429
Nb L	2.166	6.25	1.14	3.24				5.4536
Total		100.00		100.00				

Gambar 4.16 Hasil SEM EDAX paduan Ti-6%Al-7%Nb pada fasa β

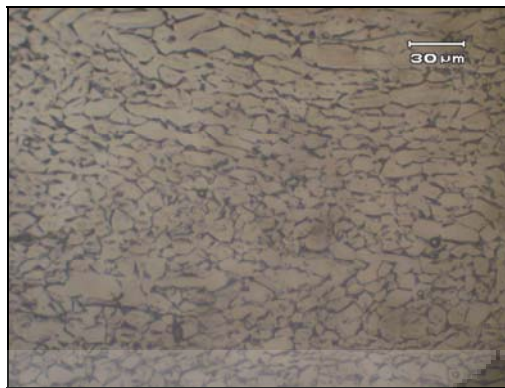
Hasil pengamatan SEM EDAX paduan Ti-6%Al-7%Nb pada posisi fasa β serta analisa komposisi kimia mikro mengandung unsur 6,25%Nb. Sebaliknya, pada posisi fasa α tidak mengandung unsur Nb (Gambar 4.15). Jadi unsur Nb hanya terkandung di dalam fasa β . Hal ini menunjukkan fakta bahwa pembentukan fasa β disebabkan karena adanya perbedaan konsentrasi endapan kandungan Nb di fasa β yang lebih tinggi dari pada fasa α .

4.5.2 Pengaruh Niobium Terhadap Struktur Mikro

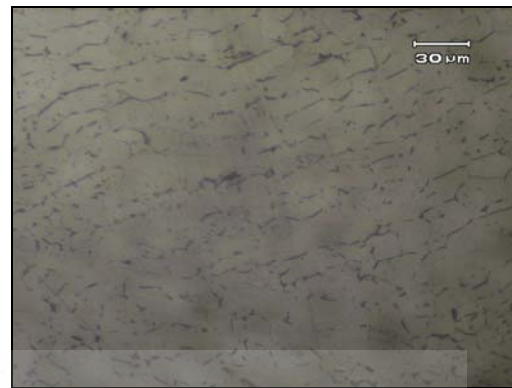
Hasil pengamatan struktur mikro pengaruh kandungan Nb ditunjukkan pada Gambar 4.17 Gambar 4.18, Gambar 4.19 untuk laku panas 1000⁰C dan Gambar 4.20, Gambar 4.21, Gambar 4.22, untuk perlakuan panas pada suhu 1100⁰C. Struktur mikro Ti-6%Al-Nb terdiri dari 2 fasa yang terbentuk yaitu fasa alfa (warna putih) dan fasa beta (warna hitam), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6 pada bab sebelumnya.



Gambar 4.17 Foto Struktur Mikro Ti-Al-1% Nb



(a)



(b)



(c)

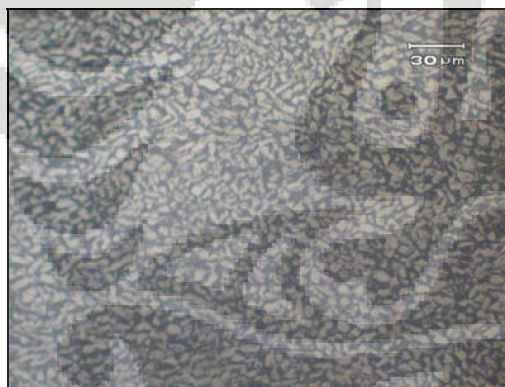
Keterangan:

- a. Sampel 4nb-a
- b. Sampel 4nb-b
- c. Sampel 4nb-c

Etsa HF 3%

Fasa α berwarna hitam/ gelap
Fasa β berwarna putih/ terang

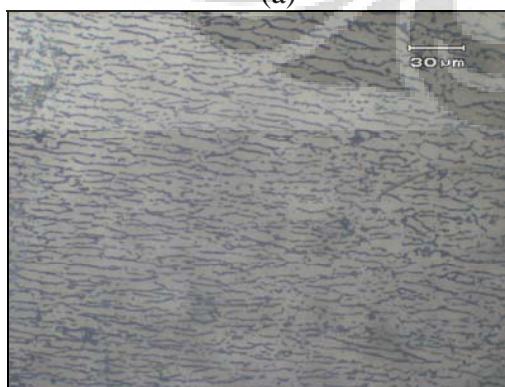
Gambar 4.18 Foto Struktur Mikro Ti-Al-4% Nb



(a)



(b)



(c)

Keterangan:

- a. Sampel 7nb-a
- b. Sampel 7nb-b
- c. Sampel 7nb-c

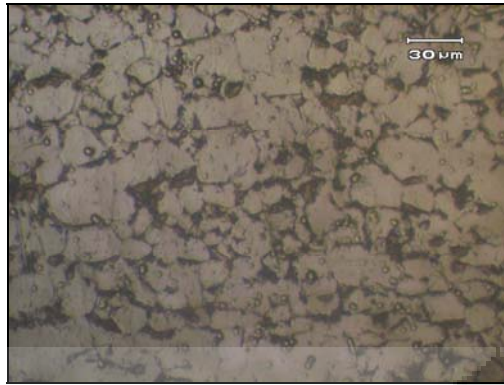
Etsa HF 3%

Fasa α berwarna hitam/ gelap
Fasa β berwarna putih/ terang

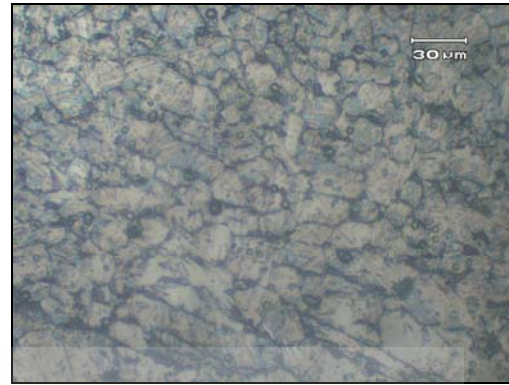
Gambar 4.19 Foto Struktur Mikro Ti-Al-7% Nb

Pada sub bab sebelumnya telah dibahas bahwa nilai kekerasan pada sampel 1nb lebih rendah bila dibandingkan dengan Titanium paduan alfa. Fenomena ini terjadi karena kandungan 1% Nb tidak cukup untuk membentuk fasa beta dalam paduan pada temperatur proses 1000⁰C. Gambar 4.17 merupakan foto struktur mikro dari sampel 1nb, pada paduan ini fasa beta yang terbentuk cukup kecil diawah 10%, maka dapat disimpulkan bahwa benar sebaran fasa beta di bawah 10% pada paduan Ti-Al-1%Nb dengan laku panas 1000⁰C belum dapat mengeraskan material paduan. Fenomena ini terjadi karena pada suhu 1000⁰C, sebagian fasa alfa bertransformasi menjadi fasa beta dan fasa alfa sisa masih ada. Pada saat pendinginan sebagian besar fasa beta bertransformasi menjadi fasa alfa. Akibatnya sebaran fasa beta relatif sedikit dan endapan Al-Nb pada fasa beta tidak terbentuk.

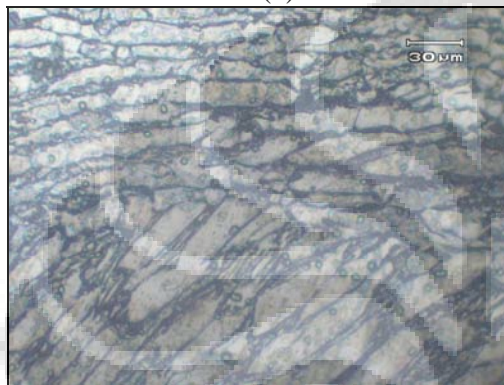
Dari hal tersebut di atas fungsi unsur Nb terlihat tidak jelas. Oleh karena itu dilakukan pengerjaan perlakuan panas pada suhu yang lebih tinggi lagi (1100⁰C), dengan harapan seluruh fasa alfa bertransformasi menjadi fasa beta pada suhu tersebut. Pada pemanasan suhu 1100⁰C ini fungsi Niobium tampak jelas. Seperti yang ditunjukkan dari hasil uji kekerasan dan pengamatan struktur mikro pada Gambar 4.20, Gambar 4.21, Gambar 4.22, serta grafik uji kekerasan pada Gambar 4.14, peningkatan kandungan Nb diikuti dengan peningkatan kekerasan dan distribusi sebaran fasa beta. Hal ini berarti pada suhu 1100⁰C fasa beta sebagian bertransformasi menjadi fasa alfa dan sebagian tidak bertransformasi karena adanya unsur Nb membentuk endapan Al-Nb.



(a)



(b)



(c)

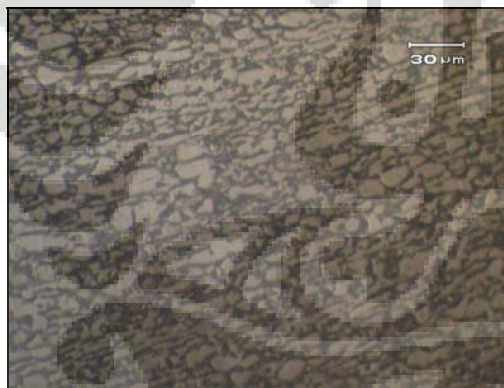
Keterangan:

- a. Sampel 1nb.i-a
- b. Sampel 1nb.i-b
- c. Sampel 1nb.i-c

Etsa HF 3%

Fasa α berwarna hitam/ gelap
Fasa β berwarna putih/ terang

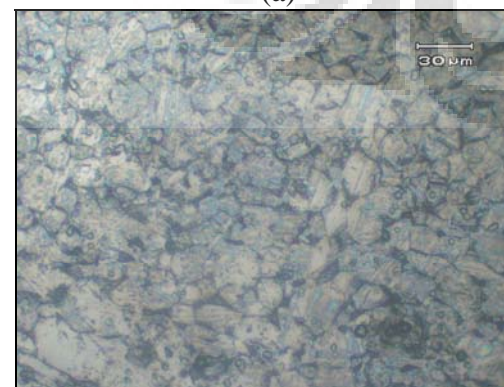
Gambar 4.20 Foto Struktur Mikro Ti-Al-1% Nb Laku Panas 1100 °C



(a)



(b)



(c)

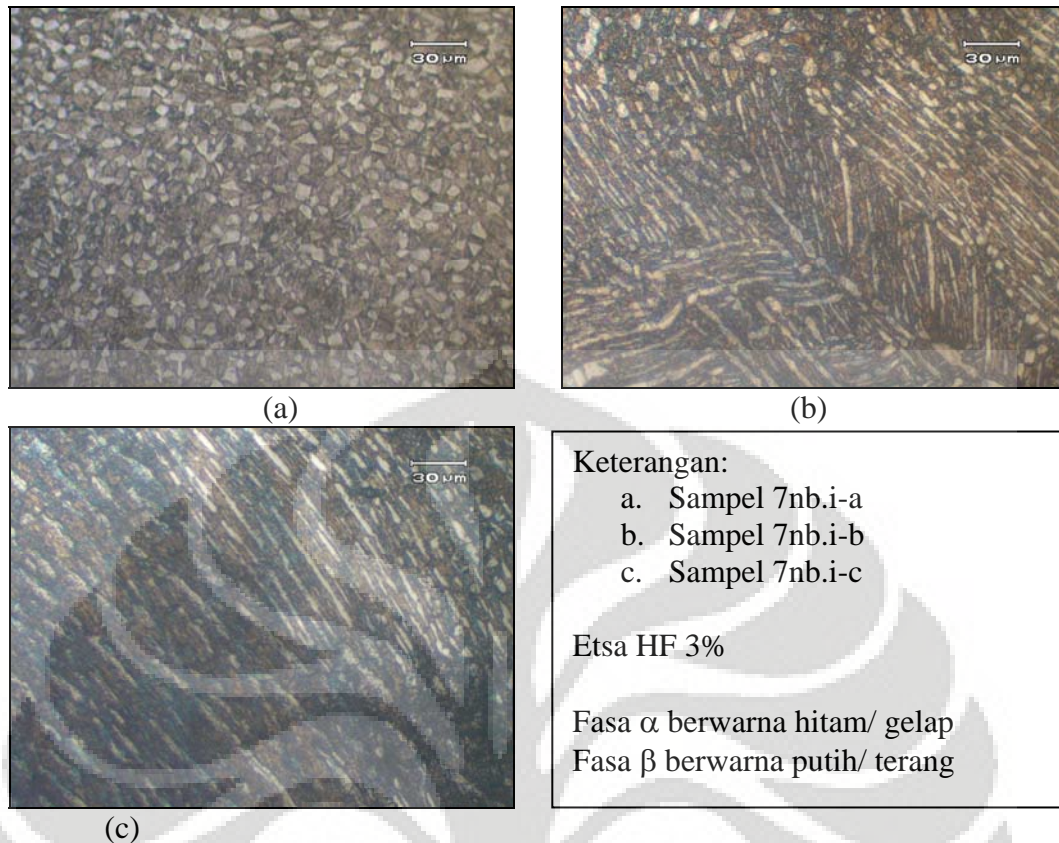
Keterangan:

- a. Sampel 4nb.i-a
- b. Sampel 4nb.i-b
- c. Sampel 4nb.i-c

Etsa HF 3%

Fasa α berwarna hitam/ gelap
Fasa β berwarna putih/ terang

Gambar 4.21 Foto Struktur Mikro Ti-Al-4% Nb Laku Panas 1100 °C



Gambar 4.22 Foto Struktur Mikro Ti-6Al-7% Nb Laku Panas 1100⁰C

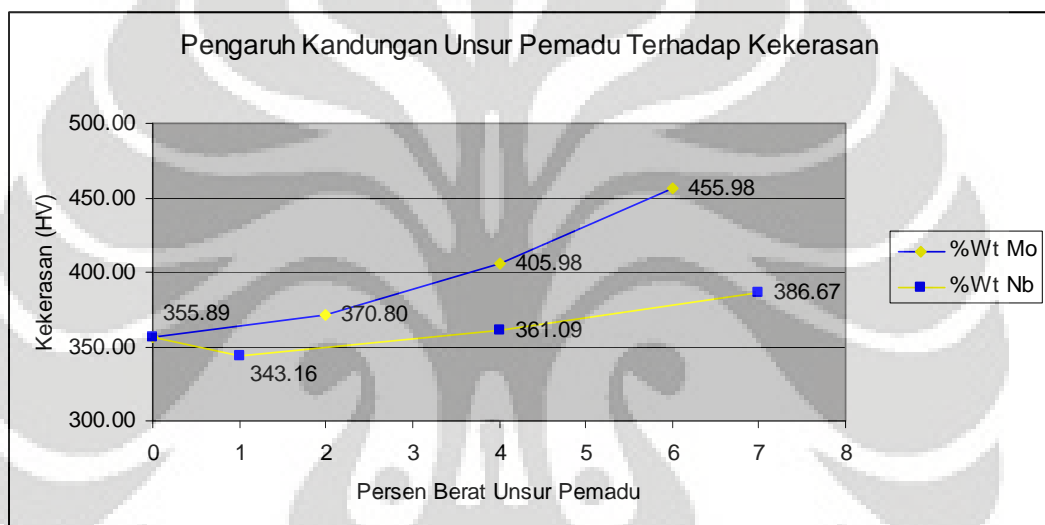
4.6 Perbedaan Penambahan Unsur Mo Dan Nb Sebagai Penstabil Fasa Beta

Unsur Mo dan Nb didalam Ti-6% Al mempunyai fungsi yang sama, yaitu bertindak sebagai penstabil fasa beta. Namun demikian ada perbedaannya yaitu pada pangerjaan perlakuan panas. Unsur Mo sebagai pembentuk fasa beta memerlukan pemanasan pada suhu 1000⁰C. Pada suhu tersebut fasa alfa bertransformasi penuh menjadi fasa beta. Selama pendinginan lambat di udara, fasa beta bertransformasi sebagian menjadi fasa alfa dan sebagian tetap pada fasa beta, akibat kandungan Mo. Fakta yang sama berlaku juga untuk kandungan unsur Nb. Hanya saja dengan adanya kandungan unsur Nb memerlukan suhu perlakuan panas yang lebih tinggi yaitu 1100⁰C.

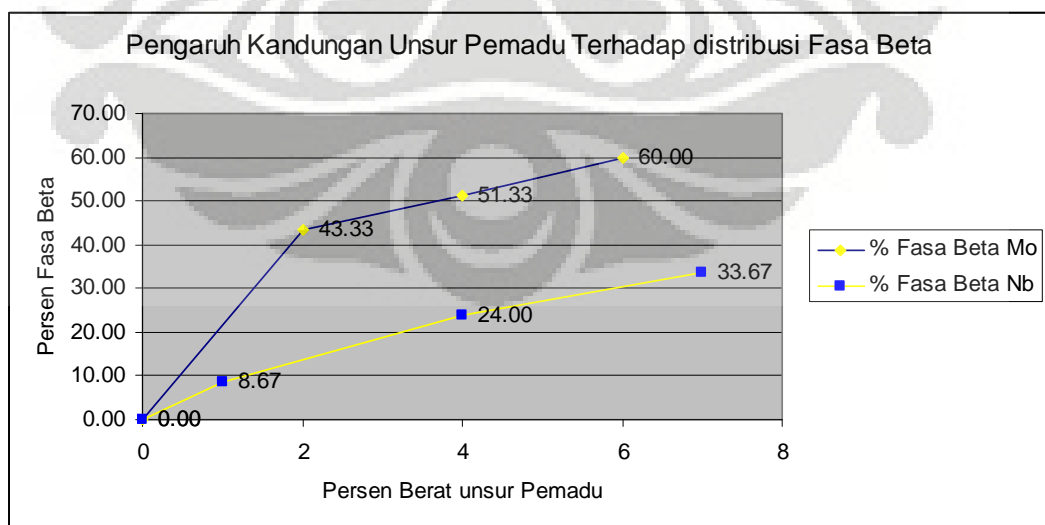
Perbedaan lainnya adalah dipandang dari aspek peleburan. Logam Nb (2477⁰C) mempunyai titik lebur yang lebih rendah dari Mo (2623⁰C). Hal ini berpengaruh

terhadap proses pemaduan, Nb cair lebih mudah dan lebih cepat larut dalam Ti cair, jika dibandingkan dengan Mo cair.

Unsur Mo dan Nb dalam paduan $Ti\alpha-\beta$ memiliki kecenderungan untuk mengeraskan paduan, karena adanya endapan Al-Mo dan Al-Nb. Unsur Mo memberikan efek peningkatan kekerasan lebih tinggi dibandingkan dengan unsur Nb, seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.23. Unsur Mo juga meningkatkan distribusi fasa beta yang terbentuk dalam paduan lebih banyak seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.24.



Gambar 4.23 Grafik Pengaruh Mo dan Nb Terhadap Kekerasan



Gambar 4.24 Grafik Pengaruh Mo dan Nb Terhadap Prosentase Fasa Beta

BAB 5 KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan pembahasan dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Nilai kekerasan paduan Ti dapat ditingkatkan dengan penambahan unsur Al, Mo dan Nb
2. Penambahan unsur Mo dan Nb membentuk fasa beta pada paduan Ti α - β
3. Pembentukan fasa beta meningkatkan kekerasan paduan tipe Ti α - β
4. Kekerasan dan distribusi fasa beta pada paduan Mo lebih tinggi dibandingkan pada paduan Nb
5. Unsur Mo dan Nb terbukti dapat mensubstitusi unsur V sebagai penstabil fasa beta dalam paduan tipe Ti α - β

DAFTAR REFERENSI

1. Ninomi Mitsuo, (2002) "*Recent Metallic Materials For Biomedical Application*", Journal Of Metallurgical And Transaction A, Vol. 33A, Page 477.
2. Hasimoto, Keizo, et.al, (1994) "*Alloy Design Of Gamma Titanium Alumunide Intermetallic Compounds*", Nippon Steel Technical Report No 62.
3. ASM Hand Book, (2000) "*Titanium A Technical Guide*", The Material Information Society, Second Edition.
4. ASM Hand Book Vol. 2, (1995) "*Properties and Selection : Non-Ferrous Alloys and Special Purpose Materials*", The Material Information Society, Fourth Printing.
5. Kuroda Daisuke, et.al, (1998) "*Design And Mechanical Properties Of New b Type Titanium Alloys For Implant Material*", Journal Of Material Science And Engineering A243.
6. Aluminium, diakses Oktober 2009 (on line), www.en.wikipedia.org
7. Molybdenum, diakses Oktober 2009 (on line), www.en.wikipedia.org
8. Niobium, diakses Oktober 2009 (on line), www.en.wikipedia.org
9. Morinaga M, et.al, "*Teoritical Design Of Beta Type Titanium Alloys*", Journal Of The Mineral, Metals & Material Society, 1993.
10. Laboratorium Metalografi & HST Departemen Metalurgi Dan Material Universitas Indonesia, (2009) "*Modul Praktikum Metalografi*".
11. Albers, R.C, (1997) "*Alloy Design and Phase Stability Of The Ternary Alloy Titanium-Aluminum-Niobium*", Los Alamos National Laboratory.
12. Arianti, Myrna, (2007) "*Teknik Pengamatan Strktur Mikro*", Hand Out.
13. Meredith, D.O, et.al, "*Is Surface Chemical Important For Orthopedic Implant Material?*". Journal Of Material Science : Mater Med, 2007.
14. Nansaarnng, Santirat And Srichandds, Panya, (2006) "*Synthesis Of Intermetallic Coumpounds Of Ti-Al And Ti-Al-Nb System And Their Properties*", Proceedings Of The 4th WSEAS Conf, Greece.

15. Pelaez-Abellan, E, (2004) "*Biocompatibility Increase Of Titanium Through Anodic Oxidation*", Biomaterial 25.
16. Perepezko, J.H, et.al, (1992) "*High Temperature Phase Stability In Ternary Titanium Aluminides*", 3rd International SAMPE Metal Conference.
17. Saunders, N, (1996) "*Modeling Of Phase Equilibria In Ti-Alloys*", Titanium '95: Science And Technology, London.
18. Shuleshova, O, et.al, (2009) "*Phase Selection In Undercooled Ti-Al-Nb Melts*", Journal Of Physics: Conference Series 144.
19. Sikora, T, (1996) "*EXAFS Study Of The Local Atomic Order In Ti_{2Alx} ($X=Nb,Mo$) B2 Intermetallic Compunds*", Journal De Physique IV.
20. Smallman, R.E, (1991) "*Metalurgi Fisik Modern*" Gramedia Pustaka Utama, Edisi Keempat.
21. Surdia, Tata and Saito, Shinroku, (2000) "*Pengetahuan Bahan Teknik*", Pradnya Paramita, Cetakan Kelima.
22. Universitas Indonesia, (2008) "*Pedoman Teknis Penulisan Tugas Akhir Mahasiswa Universitas Indonesia*", Universitas Indonesia.
23. Williams, D.F, (1994) "*Titanium: Epitome Of Biocompatibility Or Cause For Concern*", The Journal Of Bone And Joint Surgery Volume 76-B.