

**PENGARUH IMPLANTASI ION BERBASIS NITROGEN TERHADAP
KARAKTERISTIK *STAINLESS STEEL* 316L UNTUK MATERIAL
IMPLAN**

SKRIPSI



FIRMAN MAULANA IKHSAN

PROGRAM STUDI S-1 FISIKA

DEPARTEMEN FISIKA

FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

UNIVERSITAS AIRLANGGA

2016

**PENGARUH IMPLANTASI ION BERBASIS NITROGEN TERHADAP
KARAKTERISTIK STAINLESS STEEL 316L UNTUK MATERIAL
IMPLAN**

SKRIPSI

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains Bidang
Fisika Pada Fakultas Sains Dan Teknologi
Universitas Airlangga**

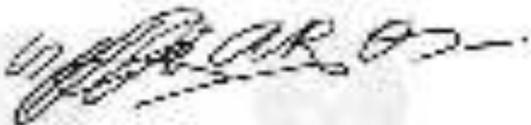
Oleh:

**Firman Maulana Ikhwan
081211331003**

Tanggal Lulus : 20 Juli 2016

Disetujui oleh :

Pembimbing I



**Dr. Diony Izak Rodyardio, M.Si
NIP. 196802011993031004**

Pembimbing II



**Dr. Adri Supardi, M.Si
NIP. 195603031986011002**

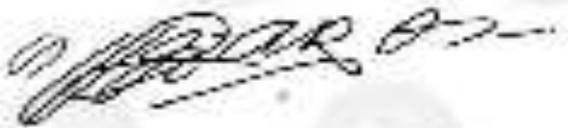
LEMBAR PENGESAHAN NASKAH SKRIPSI

Judul : Pengaruh Implantasi Ion Berbasis Nitrogen Terhadap Karakteristik Stainless Steel 316L Untuk Material Implan
Penyusun : Firman Maulana Ikhsan
NIM : 081211331003
Pembimbing I : Drs. Djony Irak Rudyardjo, M.Si
Pembimbing II : Drs. Adri Supardi, M.S
Tanggal Seminar : 20 Juli 2016

Ditetujui Oleh:

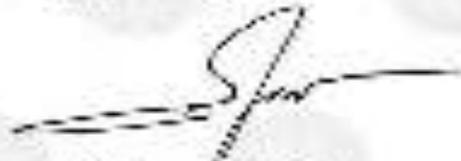
Pembimbing I

Pembimbing II



Dr. Djony Irak Rudyardjo, M.Si

NIP. 196302011993031004



Dr. Adri Supardi, M.S

NIP. 195603031986011002

Mengetahui,

Ketua Program Studi S1 Fisika
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Airlangga



Dr. Moh. Yasin, M.Si
NIP. 196703121991021001

PEDOMAN PENGGUNAAN SKRIPSI

Skripsi ini tidak dipublikasikan, namun tersedia di perpustakaan dalam lingkungan Universitas Airlangga, diperkenankan untuk dipakai sebagai referensi kepustakaan, tetapi pengutipan harus seizin penyusun dan harus menyebutkan sumbernya sesuai kebiasaan ilmiah.

Dokumen skripsi ini merupakan hak milik Universitas Airlangga.

Firman Maulana Ikhsan, 2012. Pengaruh Implantasi Ion Berbasis Nitrogen Terhadap Karakteristik *Stainless Steel 316L* Untuk Material Implan. Skripsi ini dibawah bimbingan Drs. Djony Izzak Rudyarjo, M.Si dan Jan Ady, S.Si, M.Si Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Airlangga

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian Pengaruh Implantasi Ion Berbasis Nitrogen Terhadap Karakteristik *Stainless Steel 316L* untuk Material Implan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi energi implantasi terhadap karakteristik sifat mekanik permukaan, densitas dan ketahanan korosi *stainless steel 316L*. Plat *stainless steel 316L* diimplantasi ion nitrogen dengan dosis optimum 5×10^{16} ion/cm³ untuk variasi energi implantasi 70, 75, 80, 85 dan 90 keV. Sampel hasil implantasi kemudian dikarakterisasi dengan uji densitas, kekerasan, ketahanan korosi dan uji struktur mikro menggunakan SEM-EDX. Hasil uji menunjukkan terjadi peningkatan kekerasan dan ketahanan korosi pada sampel yang terimplantasi ion nitrogen dan mencapai titik optimum pada energi implantasi 80 keV. Hal tersebut juga didukung oleh hasil analisis SEM-EDX yang menunjukkan adanya penambahan kandungan nitrogen dari batas maksimum standar ASTM 2000 untuk *stainless steel 316L* sebesar 0,1% menjadi 2,2%. Sedangkan pada pengujian densitas, kerapatan bahan cenderung konstan pada variasi energi yang dilakukan, namun mengalami peningkatan sesudah implantasi.

Kata Kunci : *Implantasi ion nitrogen, stainless steel 316L, kekerasan, densitas, ketahanan korosi*

Firman Maulana Ikhsan, 2012. The Effect of Ion Implantation Nitrogen Based on Stainless Steel 316L of Characterization for Implant Materials. The Final Assignment under guidance Drs. Djony Izzak Rudyarjo, M.Si and Jan Ady, S.Si, M.Si Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Airlangga.

ABSTRACT

The research about Effect of Ion Implantation Nitrogen Based on Stainless Steel 316L of Characterization for Implant Materials. The purpose of this research are knowing the influence of variation implantation energy on surface mechanical properties, density and corrosion resistance stainless steel 316L characterization. Plate *stainless steel* 316L was implanted with the optimum ion dose 5×10^{16} ion/cm³ for implantation energy variation of 70, 75, 80, 85, 90 keV. The samples of implantation was characterized with density test, hardness test, corrosion resistance test and microstructure was observed by SEM-EDX. The results of test indicate an enhancement hardness and corrosion resistance behavior for samples of nitrogen implanted layer and reach optimum level on implantation energy 80 keV. It is also supported by SEM-EDX analysis showed nitrogen content improvement according ASTM 2000 maximum standard for stainless steel 316L 0,1% become 2,2%. While for density test, density of material is constant for some energy variation. However, showed there was increased density after implantation.

Keyword : *nitrogen ion implantation, stainless steel 316L, hardness, density, corrosion resistance*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT karena berkat rahmat, taufik, ilmu dan pengetahuan, hidayah, beserta Muhammad Rasulullah SAW sholawat serta salam yang tercurahkan kepada beliau penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Pengaruh Implantasi Ion Berbasis Nitrogen Terhadap Karakteristik *Stainless Steel* 316L Untuk Material Implan**” dengan lancar.

Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung memberikan bimbingan dan dorongan yang dibutuhkan. Untuk itu penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada :

1. Allah SWT yang telah memberikan karunia dan rahmat-Nya kepada penulis sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan lancar,
2. Bapak Rijasin, Ibu Endang Susilowati, Mas Rizal Muhammad Sidiq dan adik Annisa Nur Habiba atas segala dukungan, doa, semangat, kasih sayang, perhatian dan kesabaran hingga saat ini dan selamanya sehingga skripsi dapat terselesaikan dengan sebaik-baiknya,
3. Almarhumah Ibu Keni Ameria Sulistiatie, yang telah memberikan kasih sayang dan mengajarkan arti pentingnya sebuah perjuangan sehingga penulis menjadi seperti saat ini,
4. Drs. Moh. Yasin, M.Si, selaku Kepala Departemen Fisika Universitas Airlangga, yang telah memberikan dorongan dalam penyusunan naskah skripsi ini,
5. Drs. Djoni Izak Rudyardjo, M.Si, selaku pembimbing I yang selalu memberikan masukan dan meluangkan waktu bagi penulis untuk berkonsultasi mengenai masalah skripsi ini,
6. Dr. Adri Supardi, M.S, selaku pembimbing II yang juga selalu memberikan masukan dan meluangkan waktu bagi penulis untuk berkonsultasi mengenai skripsi ini,

7. Drs. Siswanto, M.Si, selaku dosen penguji I dan dosen wali atas kesabaran dan bimbingannya dalam membantu kegiatan perkuliahan dan penyelesaian skripsi ini,
8. Prof. Dr. Retna Apsari, M.Si, selaku dosen penguji II atas saran dan bimbingannya dalam penyusunan skripsi ini,
9. Drs. BA. Tjipto Sujitno, MT atas bantuan, diskusi dan informasi selama penulis melakukan pengujian di BATAN,
10. Ir. Teguh Rahardjo, MT selaku Kepala Laboratorium Pengujian Material ITN Malang yang telah mengizinkan peminjaman alat uji kekerasan,
11. Teman-teman Grup Fisika Material Nandia, Dila, Dewi, Darma, Illiyin dan lainnya yang telah memberi bantuan baik moril maupun materiil serta waktu diskusinya demi terselesaikannya skripsi ini,
12. Teman diskusi Firdaus yang telah banyak memberikan masukan dan saran mengenai skripsi ini, serta Soni, Ulil, Haris, Rizky “Ustad” sebagai partner pendakian dan PES atas segala pengalamannya yang mengesankan,
13. Sonya Retno Mangesti sebagai partner yang telah banyak memberikan bantuan, arahan, semangat dan memberi masukan mengenai naskah skripsi ini,
14. Teman-teman Fisika Angkatan 2012 dan KKN-BBM Ke-52 Desa Pendil Kecamatan Banyuwangi Probolinggo atas 4 tahun perkuliahan dan kenangannya yang sangat super,
15. Seluruh senior dan junior fisika yang telah membantu dalam proses penelitian dan perkuliahan Penulis,
16. Semua pihak yang telah banyak membantu dalam proses pengerjaan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Untuk itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diperlukan agar dapat meningkatkan potensi ilmu pengetahuan dalam diri Penulis maupun orang lain pada umumnya.

Surabaya, Juli 2016

Penulis

Firman Maulana Ikhsan

SURAT PERNYATAAN TENTANG ORISINALITAS

Yang berada tangan di bawah ini :

Nama : Firman Maulana Ikhsan
NIM : 081211331003
Program Studi : Fisika
Fakultas : Sains dan Teknologi
Jenjang : Sarjana (S1)

Menyatakan bahwa saya tidak melakukan kegiatan plagiat dalam penulisan skripsi saya yang berjudul :

PENGARUH IMPLANTASI ION BERBASIS NITROGEN TERHADAP KARAKTERISTIK STAINLESS STEEL 316L UNTUK MATERIAL IMPLAN

Apabila suatu saat nanti terbukti melakukan tindakan plagiat, maka saya akan menerima sanksi yang telah ditetapkan.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Sumbayn, 20 Juli 2016



Firman Maulana Ikhsan
NIM. 081211331003

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	i
LEMBAR PERSETUJUAN	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR PEDOMAN PENGGUNAAN SKRIPSI	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
SURAT PERNYATAAN TENTANG ORISINALITAS	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Biomaterial	6
2.2 Paduan <i>Stainless Steel</i> 316L	9
2.3 Teknik Implantasi Ion	13
2.3.1 Prinsip Kerja Alat Implantasi Ion	14
2.3.2 Energi dan Dosis Ion	16
2.3.3 Interaksi Ion Dengan Permukaan	18
2.3.4 Jangkauan Ion	20
2.4 Nitrogen Sebagai Ion Dopan	21
2.5 Kekerasan Material	23
2.6 Uji Kekerasan Material	26

2.7	Korosi Pada Logam	27
2.8	Uji Korosi (<i>Immersion Corrosion</i>)	29
2.9	Uji Densitas.....	30
2.10	Struktur Mikro	30
2.11	SEM-EDX (<i>Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-Ray</i>)	31
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		34
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	34
3.2	Bahan dan Alat Penelitian	34
3.2.1	Bahan-bahan Penelitian	34
3.2.2	Alat-alat Penelitian	35
3.3	Diagram Alir Penelitian	36
3.4	Prosedur Penelitian	37
3.4.1	Proses Preparasi Sampel	37
3.4.2	Proses Implantasi Ion	37
3.4.3	Proses Karakterisasi Sampel	38
3.4.3.1	Uji Densitas	38
3.4.3.2	Uji Kekerasan (Metode Vickers)	39
3.4.3.3	Uji Korosi (Metode <i>Immersion Corrosion</i>)	40
3.4.3.4	Uji SEM-EDX	41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		43
4.1	Hasil Uji Densitas	43
4.2	Hasil Uji Kekerasan	45
4.3	Hasil Uji Korosi	50
4.4	Hasil Uji SEM-EDX	53
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		57
5.1	Kesimpulan	57
5.2	Saran	57
DAFTAR PUSTAKA		59
LAMPIRAN		62

DAFTAR TABEL

No	Judul Tabel	Halaman
2.1	Material yang digunakan dalam tubuh	7
2.2	Penggunaan biomaterial	7
2.3	Komposisi bahan SS 316L	11
2.4	Sifat mekanik biomaterial logam	12
2.5	Beberapa jenis komponen yang memerlukan <i>surface treatment</i> dengan teknik implantasi ion	14
3.1	Komposisi larutan <i>simulated body fluid</i>	35
3.2	Data sampel pengujian implantasi ion	38
4.1	Hasil Uji Densitas	44
4.2	Hasil Uji Kekerasan	46
4.3	Hasil Uji Korosi	50

DAFTAR GAMBAR

No	Judul Gambar	Halaman
2.1	Jenis-jenis korosi pada biomaterial	8
2.2	(a) Aplikasi <i>stainless steel</i> sebagai implan tulang	9
	(b) Nomor 1-8 menunjukkan sisipan posisi lubang sekrup	9
2.3	Distribusi modulus young pada tulang tibia	10
2.4	Struktur mikro pada SS 316L hasil analisis SEM-EDX	11
2.5	Susunan atom target akibat implantasi ion	13
2.6	Sistem implantasi ion	15
2.7	Interaksi antara ion dengan permukaan	19
2.8	Bentuk lintasan ion dopan dalam material target	21
2.9	Impuritas pada zat padat	22
2.10	Perbandingan skala pada beberapa metode uji kekerasan	25
2.11	Hubungan antara kekerasan dan kekuatan tarik untuk besi cor, baja dan kuningan	26
2.12	Intan piramid dari samping (a) dan dari bawah (b)	26
2.13	Struktur mikro dari paduan besi dan kromium	31
2.14	Skema alat SEM	33
3.1	Diagram alir pelaksanaan penelitian	36
3.2	Sampel uji	37
3.3	Neraca digital	39
3.4	Pengujian kekerasan	40
3.5	Proses uji korosi	41
3.6	Seperangkat SEM-EDX	42
4.1	Grafik hubungan variasi energi implantasi terhadap densitas	44
4.2	Lekukan hasil indentasi	46
4.3	Grafik hubungan antara variasi energi implantasi terhadap kekerasan	47
4.4	Grafik antara variasi energi implantasi terhadap laju korosi	51
4.5	Struktur morfologi sampel dosis 5×10^{16} pada energi implantasi 80 keV	53

4.6	Struktur morfologi sampel dosis 5×10^{16} pada energi implantasi 90 keV	54
4.7	Kandungan nitrogen hasil implantasi pada energi implantasi 80 keV	54

DAFTAR LAMPIRAN

No	Judul Lampiran	Halaman
Lampiran 1	Hasil Pengukuran Densitas	62
Lampiran 2	Hasil Pengukuran Kekerasan	73
Lampiran 3	Hasil Pengukuran Laju Korosi	79
Lampiran 4	Hasil Pengujian SEM-EDX	84
Lampiran 5	Dokumentasi Penelitian	86

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Logam merupakan material yang sering digunakan sebagai bahan implan dalam dunia medis. Material implan yang digunakan harus bersifat *biocompatible* (dapat diterima oleh tubuh) dan mempunyai *mechanical properties* (sifat mekanik) yang sesuai dengan kondisi tubuh manusia. Beberapa pilihan logam klinis yang sering digunakan dalam material implan adalah paduan *cobalt*, paduan titanium, dan *stainless steel* (Giat dkk. 2012).

Stainless steel 316L merupakan jenis baja tahan karat yang banyak digunakan untuk tujuan bedah ortopedis karena ketahanan korosi, sifat mekanik yang baik dan harganya yang relatif murah (Sridhar *et al.* 2003). Selain itu ketersediaan bahan baku logam *stainless steel* dalam bentuk *Ferro-Nickel* di Indonesia sangat melimpah, namun belum dapat dimanfaatkan dengan baik (Jujur dkk. 2013).

Namun paduan material *stainless steel* ini memiliki biokompatibilitas yang kurang baik. Sebab berdasarkan pengalaman klinis sebelumnya, diketahui bahwa *stainless steel 316L* ini rentan terjadi korosi lokal pada tubuh manusia yang menyebabkan pelepasan ion-ion logam disekitar jaringan implan manusia yang dapat membahayakan pasien (Sridhar *et al.* 2003). Selain itu, *stainless steel* jenis ini memiliki *mechanical properties* yang lebih rendah dibanding material implan yang lain (Park *et al.* 2007), sehingga untuk mengatasi hal tersebut perlu dilakukan

upaya preventif, salah satu diantaranya dengan melakukan teknik rekayasa material pada bahan implan.

Teknik implantasi ion merupakan cara yang paling efektif dalam memodifikasi sifat permukaan tanpa merusak sifat bahan secara massal. Teknik ini dilakukan dengan cara menyisipkan ion asing (dopan) berenergi tinggi ke dalam permukaan material target pada temperatur rendah, sehingga kemungkinan timbulnya *thermal stress* dapat dihindari karena dapat terjadi distorsi bahan. Selain itu, dimensi dari bahan tidak berubah setelah dilakukan implantasi ion (Hongxi *et al.* 2012). Kedalaman penyisipan ion juga dapat dikendalikan dengan mengendalikan tegangan pemercepat ion terimplantasi (Sujitno, 2006). Energi maksimum ion yang didepositkan pada material sangat dipengaruhi oleh massa ion dan massa atom sasaran sehingga akan menentukan jumlah sisipan yang akan membentuk fasa baru (Susita dkk. 1996).

Jenis ion nitrogen merupakan salah satu jenis ion dopan yang sering digunakan untuk aplikasi biomedis (Pudjorahardjo dkk. 2003). Ion nitrogen yang diimplantasikan pada *stainless steel*, akan mengubah struktur mikro pada permukaannya dengan kedalaman tertentu. Perubahan struktur mikro tersebut terjadi akibat interaksi ion-ion berenergi tinggi dengan sasaran sehingga menyebabkan terbentuknya pasangan kekosongan (*vacancies*) dan sisipan (*interstition*) yang selanjutnya pada kondisi tertentu membentuk fasa Fe-N (Susita dkk. 1996). Sudjatmoko dkk (1999) menyatakan bahwa perubahan sifat mekanik suatu bahan logam terjadi pada dosis antara 10^{16} ion/cm² hingga 10^{17} ion/cm². Sedangkan variasi energi yang sering digunakan untuk implantasi ion adalah 10

hingga 100 keV. Kedalaman penyisipan atom yang terlalu dalam dapat menyebabkan bahan bersifat getas (Susita dkk. 1996).

Pada penelitian sebelumnya (Sudjatmoko dkk. 2013), telah dilakukan proses implantasi ion nitrogen pada *stainless steel* dengan variasi energi ion 60 keV, 80 keV, 100 keV. Pada variasi energi ion tersebut, terjadi peningkatan baik kekerasan maupun ketahanan korosi pada energi optimum 80 keV. Kekerasan optimum bahan tidak terjadi pada energi yang semakin besar, akan tetapi pada suatu energi ion tertentu. Hal ini dikarenakan pada energi yang semakin besar, pada permukaan bahan akan terbentuk struktur amorf yang akan menurunkan nilai kekerasan permukaan bahan. Fasa baru yang terbentuk berpotensi meningkatkan ketahanan korosi pada permukaan *stainless steel*. Proses implantasi ion dengan dopan nitrogen diharapkan akan meningkatkan kekerasan dan ketahanan korosinya. Maka diperlukan energi ion dengan dopan nitrogen yang tepat untuk memperoleh karakteristik yang terbaik.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penulis akan melakukan proses implantasi ion nitrogen dengan memperkecil *range* variasi energi ion dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Sudjatmoko dkk (2013) pada energi 70 keV, 75 keV, 80 keV, 85 keV dan 90 keV pada dosis optimum 5×10^{16} ion/cm². Karakteristik *stainless steel* hasil implantasi ion nitrogen tersebut dapat dilihat melalui beberapa uji. Uji tersebut meliputi uji densitas untuk melihat kepadatan dari suatu sampel, uji kekerasan untuk melihat ketahanan sampel terhadap tekanan, uji mikroskopik untuk melihat struktur mikro dan mengetahui komposisi unsur, serta uji korosi melihat ketahanan sampel terhadap korosi.

1.2 Rumusan Masalah

Dari hasil ulasan latar belakang tersebut, agar penelitian yang dilakukan lebih terarah dan sesuai yang dikehendaki, maka dapat ditarik perumusan masalah sebagai berikut

1. Bagaimana pengaruh variasi energi ion terhadap karakteristik *stainless steel* 316L dari hasil uji yang telah dilakukan?
2. Berapa nilai energi ion yang tepat untuk mendapatkan karakter *stainless steel* 316L hasil implantasi terbaik sebagai material implan?

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah diatas, diperlukan suatu batasan permasalahan untuk penelitian ini sebagai berikut :

1. Pada penelitian ini digunakan Nitrogen sebagai ion dopan
2. Pada penelitian ini digunakan bahan *stainless steel* 316L (SS 316L) karena paduan ini banyak manfaatnya dalam bidang kedokteran
3. Variasi energi ion adalah 70 keV, 75 keV, 80 keV, 85 keV dan 90 keV.
4. Uji karakterisasi yang dilakukan meliputi uji densitas, uji kekerasan, uji korosi dan struktur mikro

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian adalah

1. Mengetahui pengaruh variasi energi ion terhadap karakteristik *stainless steel 316L*
2. Mengetahui nilai energi ion yang tepat untuk mendapatkan karakter *stainless steel 316L* hasil implantasi terbaik sebagai material implan

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi tentang pengaruh variasi energi ion pada sifat fisik dan mekanik *stainless steel 316L*, serta memperoleh energi ion yang tepat untuk paduan SS 316L sebagai produk biomaterial yang dapat dimanfaatkan sebagai material implan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biomaterial

Biomaterial merupakan suatu material yang aplikasinya digunakan dalam dunia medis. Menurut Sudjatmoko (2008) dalam John (2005) menyatakan bahwa biomaterial digunakan sebagai pengganti atau memperbaiki fungsi dari bagian tubuh manusia yang berhubungan secara berkelanjutan atau sementara dan sementara tidak terjadi kontak dalam cairan tubuh manusia dalam jangka waktu pendek atau lama. Oleh karena itu, suatu biomaterial harus memenuhi syarat-syarat diantaranya *biocompatible*, sifat-sifat mekanis dan kimianya harus dapat diterima oleh tubuh. Dalam aplikasi secara praktis, biomaterial harus mudah dibentuk oleh mesin ke dalam beberapa bentuk, mempunyai harga yang relatif lebih murah dan bahan baku material tersebut tersedia banyak dipasaran (Cahyanto, 2009).

Syarat-syarat tersebut mempersempit beberapa bahan material lain yang akan digunakan dalam bedah ortopedis. Aplikasi material dalam bidang medis terbagi menjadi beberapa jenis, diantaranya logam, keramik, polimer dan komposit. Setiap jenis material memiliki karakteristik masing-masing, sehingga aplikasinya didalam tubuh disesuaikan dengan karakteristik material tersebut. Beberapa contoh aplikasi material dalam medis disajikan dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Material yang digunakan dalam tubuh (Park et al. 2007)

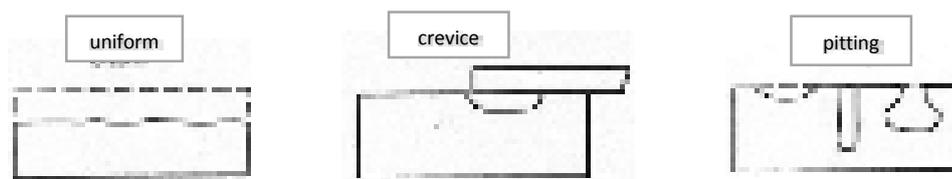
Material	Keuntungan	Kerugian	Contoh
Polimer	Elastis, mudah dibentuk	Tidak kuat, dapat terjadi deformasi	Jahitan, jaringan lunak, telinga dll
Logam	Kuat, ulet, tangguh	Korosi	Pengantian sendi, kawat gigi, plat tulang, sekrup
Keramik	Sangat <i>biocompatible</i>	Getas, tidak elastis, tegangan lemah	Gigi, implant ortopedis
Komposit	Kuat	Sulit dibuat	Semen tulang, resin gigi

Dalam biomaterial, penggunaan bedah implan dapat dikategorikan menjadi permanen dan sementara, bergantung dengan waktu yang diperlukan untuk berada dalam tubuh. Kadang-kadang implan sementara dapat menjadi tulang permanen jika tidak dilakukan pembedahan kembali, seperti plat pada tulang yang akan menjadi permanen setelah retak pada tulang telah sembuh (Park et al. 2007).

Tabel 2.2 Penggunaan Biomaterial (Park et al. 2007)

Implan permanen	
Sistem musculoskeletal	Sendi atas (bahu, siku, pergelangan tangan, jari) dan sendi bawah (pinggul, lutut, pergelangan kaki, kaki)
Sistem kardiovaskuler	Jantung, arteri, vena
Sistem pernafasan	Laring, trakea, bronkus, dada, diafragma, paru-paru, toraks
Sistem pencernaan	Tambalan gigi, esophagus, saluran empedu, liver
Sistem genital	Ginjal, ureter, urtera, kandung kemih
Implan Sementara	
Perangkat fiksasi ortopedis	Umum (sekrup, pin pinggul,), plat tulang (tulang panjang, spinal), intertrochanteric (pinggul, pin), jahitan, perekat bedah
Penutup luar dan implan parsial	Kulit buatan

Walaupun setiap material mempunyai manfaat tersendiri, namun cairan dalam tubuh manusia sangat bersifat korosif sehingga sangat mempengaruhi dan merugikan biokompatibilitas suatu material. Hal ini karena cairan dalam tubuh manusia dapat menyebabkan tidak hanya korosi seragam (*uniform corrosion*), tetapi juga korosi celah (*crevice corrosion*) dan lekuk (*pitting corrosion*) pada paduan metal (Sudjatmoko, 2008). Korosi Seragam merupakan korosi yang terjadi secara merata diseluruh permukaan logam. Korosi celah merupakan korosi menyerang daerah celah yang biasanya terjadi di daerah sekitar sekrup dan retakan tulang (Park *et al.* 2007). Sedangkan korosi lekuk merupakan korosi pada daerah lubang yang dalam pada permukaan metal. Korosi ini diawali oleh oksidan seperti oksigen yang terlarut bereaksi dengan ion-ion klorida dan dipercepat dengan adanya konsentrasi oksigen pada awal pertumbuhan (Sudjatmoko, 2008). Menurut Fajar (2013) dalam Jones (1991), ketiga jenis korosi tersebut dapat digambarkan pada Gambar 2.1.



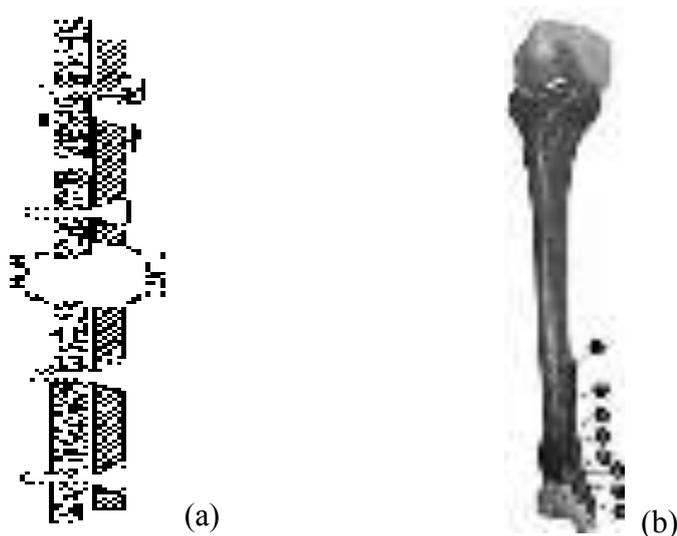
Gambar 2.1. Jenis jenis korosi pada biomaterial

Korosi pada implan secara klinis dapat ditandai dengan gejala nyeri dan pembengkakan disekitar daerah implan tanpa adanya infeksi sebelumnya. Dengan *X-Ray* akan terlihat implan yang terkelupas atau retak. Saat dilakukan pembedahan, akan terlihat perubahan warna abu-abu atau hitam pada jaringan disekitarnya dan serpihan logam dapat ditemukan dalam jaringan. Korosi juga berpengaruh terhadap

sifat mekanik material implan. Sebagian besar kegagalan ini karena efek lelah pada bahan. Sejauh mana pengaruh korosi terhadap efek lelah beban dalam tubuh manusia ini tidak dapat diketahui secara tepat (Park *et al.* 2007).

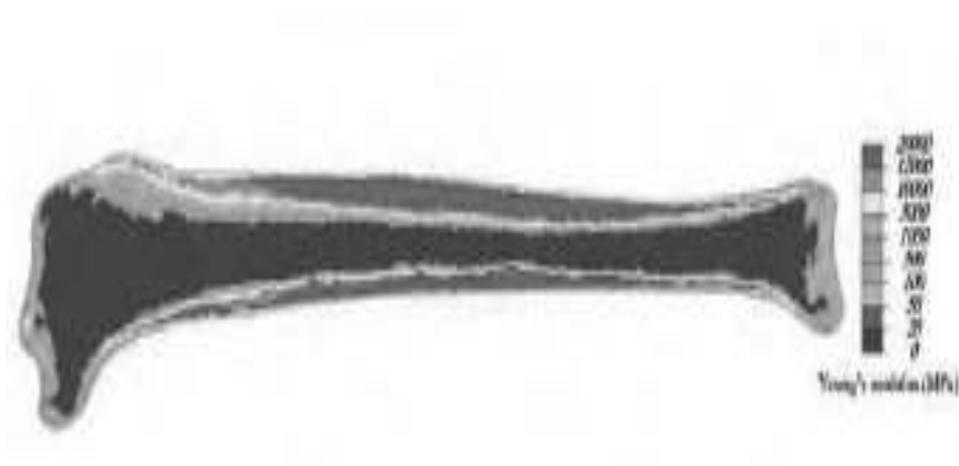
2.2 Paduan *Stainless Steel* 316L (SS 316L)

Stainless steel merupakan baja yang tahan terhadap korosi dan cocok digunakan sebagai implan tubuh manusia (Park *et al.* 2007). Selain itu, bahan material logam ini sering digunakan untuk implan ortopedis karena harganya yang murah, ketersediaan bahan bakunya yang melimpah dan pembuatannya yang relatif lebih mudah (Gary dan Nutt, 2002). Penggunaan *stainless steel* dalam tubuh manusia dapat diaplikasikan dalam bentuk *bone plate*. (Park dan Brozino, 2006) (Nourisa dan Rouhi, 2015) seperti digambarkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 (a) Aplikasi *stainless steel* sebagai implan tulang
(b) Nomor 1-8 menunjukkan sisipan posisi lubang sekrup

Paduan *stainless steel* diatas diaplikasikan pada tulang tibia. Tulang tersebut memiliki sebaran distribusi Modulus Young yang berbeda beda di setiap titiknya yang dapat dilihat pada Gambar 2.3.



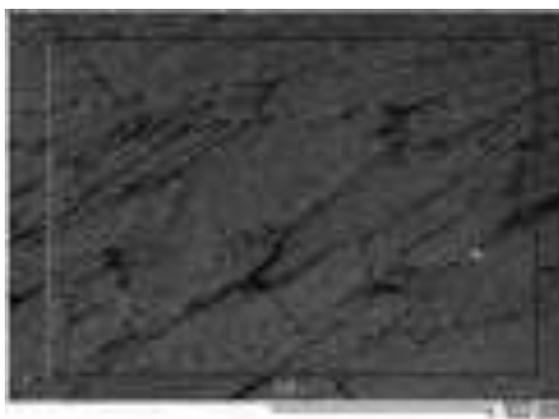
Gambar 2.3 Distribusi Modulus Young tulang tibia (Nourisa dan Rouhi, 2015)

Dalam aplikasinya, *stainless steel* yang pertama digunakan untuk bahan implan adalah *stainless steel* tipe 302 yang lebih kuat dari baja dan lebih tahan terhadap korosi. Kandungan vanadium dalam baja tipe tersebut tidak lagi dibutuhkan karena ketahanan korosinya yang buruk. Kemudian diperkenalkan *stainless steel* dengan kandungan molibdenum yang dapat meningkatkan ketahanan korosi dalam air garam. *Stainless steel* ini dikenal dengan *stainless steel* tipe 316. Pada tahun 1950 kandungan karbon dari *stainless steel* 316 ini dikurangi dari 0,08 w/o ke 0,03 w/o dan kemudian dikenal sebagai *stainless steel* tipe 316L (Park *et al.* 2007).

Tabel 2.3 Komposisi Bahan SS 316L (ASTM 2000)

Elemen	Komposisi (w/o)
Carbon	0,03 max
Mangan	2,00 max
Phospor	0,025 max
Sulfur	0,01 max
Silicon	0,75 max
Chromium	17-19
Nickel	13,00-15,00
Molybdenum	2,25-3,00
Nitrogen	0,1 max
Cooper	0,5 max
Fe	Balanced

Dari komposisi diatas, unsur Fe merupakan unsur dominan yang menyusun logam *stainless steel* 316L. Morfologi permukaan *stainless steel* terlihat lebih halus. Hasil pengujian struktur mikro yang dilakukan oleh Sudjatkoko dkk (2013) memperlihatkan morfologi permukaan yang dapat ditampilkan pada Gambar 2.4.

**Gambar 2.4** Struktur mikro pada SS 316L hasil analisis SEM-EDX

Baja SS 316L ini tidak dapat ditingkatkan sifat kekerasannya pada perlakuan panas. Akan tetapi kekuatan dan kekerasannya dapat meningkat secara jelas pada suhu ruang diikuti dengan penurunan sifat keuletan material tersebut (Anghelina *et al.* 2013). Dalam aplikasinya sebagai biomaterial, *stainless steel* jenis ini paling

banyak digunakan sebagai implan dibanding logam yang lain. Berdasarkan standar ASTM (*American Standard Testing Machine*) *mechanical properties* pada SS 316L dibandingkan dengan paduan titanium dan kobalt disajikan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Sifat mekanik biomaterial logam (Park *et al.* 2007)

Logam	UTS (MPa)	YS (MPa)	El. (%)	Hardness
SS 316L (ASTM F138 <i>cold worked</i>)	860	690	12	95 HRB <i>max.</i>
Co-Cr-Ni-Mo (ASTM 2000 <i>cold worked</i>)	1793	1586	8	-
Ti-Al-V (ASTM F136)	860	795	10	-

Catatan

UTS = *Ultimate Tensile Strength*

YS = *Yield Strength* (0,2% offset)

El. = *Elongation*

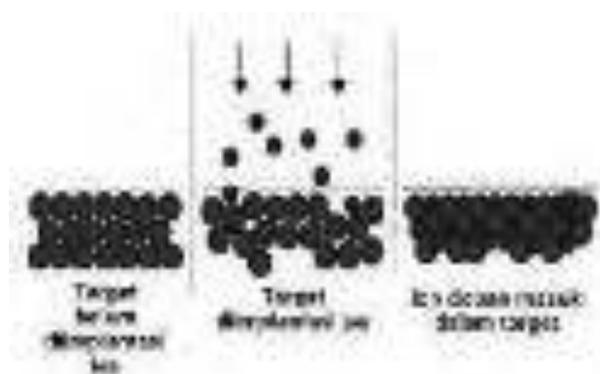
Dari data-data *stainless steel* diatas, kromium menjadi dasar utama pada *stainless steel* agar bersifat tahan terhadap korosi. Kromium merupakan unsur yang reaktif, sehingga keberadaanya dapat dipasivasi agar dapat memberikan ketahanan korosi yang baik (Park, *et al.* 2007). Pasivasi merupakan suatu cara yang digunakan untuk melindungi logam dari terjadinya karat dengan pembentukan lapisan oksida dan hidroksida sebagai lapisan pasif pada permukaan logam (Endang, 2006).

Berkaitan dengan keausan, material *stainless steel* memiliki sifat kekerasan yang rendah dan sifat tribologi yang kurang baik, sehingga membuat umur pemakaian menjadi pendek. Sifat tribologi merupakan sifat yang berkaitan dengan interaksi antar permukaan material yang saling bergerak sehingga berakibat terjadinya gesekan (*friction*), keausan (*wear*) dan kikisan (*abrasion*) (Sudjatmoko

et al. 2008). Keausan pada *stainless steel* tersebut dapat diperbaiki dengan perlakuan permukaan, salah satunya adalah dengan menggunakan teknik implantasi ion.

2.3 Teknik Implantasi Ion

Implantasi ion merupakan teknik modifikasi permukaan dengan cara menyisipkan atom-atom dopan kedalam suatu material target dengan suatu tegangan pemercepat dalam satuan elektron volt. Semua sifat mekanis, optis, magnetik dan superkonduktor semua dipengaruhi dan didominasi oleh keberadaan atom dopan tersebut (Nastasi dan Mayer, 2006).



Gambar 2.5 Susunan atom target akibat implantasi ion (Gaguk, 2011).

Selain itu, penyisipan atom-atom dopan tersebut dapat meningkatkan efek daya tahan kekerasan dan korosi, keausan serta gesekan berkurang. Hal ini dapat dimanfaatkan untuk *surface treatment* bahan atau komponen yang selalu mengalami interaksi aktif misalnya gesekan dan reaksi kimia disekitarnya (Pundjorahardjo, 2003). Pada tabel 2.5 ditampilkan beberapa jenis komponen yang memerlukan *surface treatment* menggunakan implantasi ion.

Tabel 2.5 Beberapa jenis komponen yang memerlukan *surface treatment* dengan teknik implantasi ion (Pudjorahardjo, 2003)

Jenis Komponen	Industri	Spesies Ion Dopan
Mesin penukar panas	Petrokimia, semen, batubara, kertas	Elemen reaktif (Y, Ce, Zr, Hf, Ti)
Turbin/blade/sudu	Pembangkit tenaga listrik, otomotif, kereta api	Cr atau Ta
Bearing/piston/poros engkol/roda gigi	Otomotif, kereta api, pesawat terbang	Ti dan C atau Cr dan N
Roller	Tekstil, kertas	Ta
Matabor	Perminyakan, permesinan	Ta
Dies	Otomotif, pembuatan komponen mesin	Cr atau Ta
Sendi lutut buatan, sendi siku buatan, tulang pinggang buatan	Biomedis	N

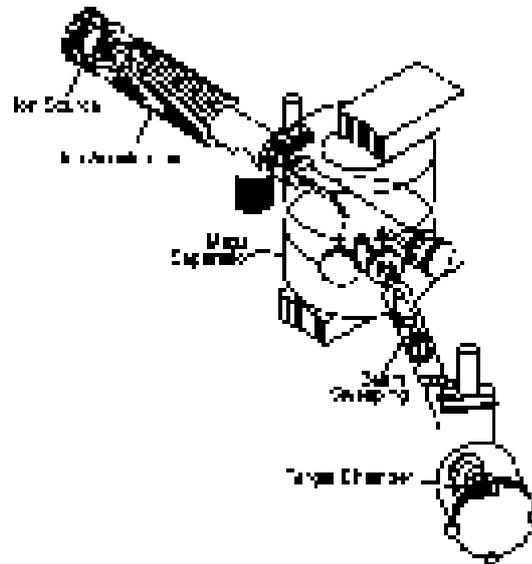
Metode ini memiliki beberapa keunggulan salah satunya adalah tidak melibatkan unsur panas, sehingga kemungkinan terjadinya *thermal stress* yang dapat mengakibatkan perubahan dimensi dapat dihindari (Sujitno, 2006). Menurut Arif (2012) dalam Moller dan Mukherjee (2002) metode ini tidak membutuhkan waktu yang lama dengan parameter-parameter yang berpengaruh seperti jenis ion, energi dan dosis ion serta sudut penembakan dapat diatur dan disesuaikan secara akurat.

2.3.1 Prinsip Kerja Alat Implantasi Ion

Implantor ion merupakan salah satu jenis dari akselerator ion yang digunakan untuk mengimplantasikan ion-ion dari suatu atom ke dalam permukaan material target (Sujitno, 2006). Implantor ion tersusun atas beberapa komponen diantaranya sumber ion, sumber daya listrik tegangan tinggi, sistem

pemisah berkas ion, tabung pemercepat, penyapu berkas dan tempat target.

Skema dari sistem implantasi ion dapat digambarkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Sistem implantasi ion (Nastasi dan Mayer, 2006).

Masing-masing bagian pada implantor ion tersebut memiliki fungsi sebagai berikut :

1. Sumber ion implantor ion digunakan untuk menghasilkan jenis ion baik berupa material gas maupun padatan (Sujitno, 2006).
2. Sumber daya listrik tegangan tinggi, masing-masing tegangan memiliki fungsi berbeda-beda. Tegangan tinggi 0-5 kV digunakan untuk pencatu sumber ion. Tegangan 0-15 kV digunakan untuk pencatu sistem ekstraktor (mengeluarkan ion ion dari ruang ionisasi ke dalam tabung pemercepat). Tegangan 0-200 kV digunakan untuk mempercepat ion ion dopan yang berada didalam tabung pemercepat (Sumaryadi, 2008).
3. Tabung pemercepat, merupakan tabung yang dihampakan untuk mempercepat suatu ion sebelum mengenai material target. Tabung

pemercepat ini terbuat dari bahan keramik didalamnya terdapat banyak elektrode yang berfungsi untuk memfokuskan ion bermuatan yang akan menumbuk material target (Harianto dkk. 2000).

4. Sistem pemisah berkas ion, tersusun atas magnet yang berfungsi untuk memisahkan ion dari unsurnya (Nastasi dan Mayer, 2006).
5. Sistem penyapu berkas, merupakan sistem yang berfungsi agar berkas ion dapat tersebar secara seragam pada permukaan material target (Nastasi dan Mayer, 2006).
6. Tempat target, material yang akan diimplantasikan ditempatkan diruang target.

Akselerator ini bekerja dengan cara menginjeksikan ion ion dari suatu atom ke dalam permukaan material target. Menurut Sujitno (2006) dalam Djalois (1998) proses ini diawali dengan pengionan atom atau molekul yang akan diinjeksikan, dipercepat didalam tabung pemercepat oleh medan listrik, pemfokusan dalam medan elektromagnet untuk kemudian ditembakkan ke dalam permukaan material target.

2.3.2 Energi dan Dosis Ion

Hasil implantasi ion pada suatu permukaan material sangat dipengaruhi oleh dua parameter yaitu energi ion dan dosis ion. Energi ion berpengaruh terhadap kedalaman penetrasi ion. Sedangkan dosis ion berkaitan dengan banyaknya konsentrasi ion yang diimplantasikan pada kedalaman tersebut (Sudjatmoko, 2008).

Energi ion dalam satuan sistem unit MKS, memiliki satuan energi Joule (J). Namun dalam kaitannya dengan interaksi antar ion, satuan energi yang digunakan adalah elektron volt (eV). Sehingga dapat didefinisikan 1eV sebagai energi kinetik elektron yang dipercepat dengan beda potensial 1V. Dengan muatan elektron $1,602 \times 10^{-19}$ C, sehingga 1eV akan setara nilainya dengan $1,602 \times 10^{-19}$ J (Nastasi dan Mayer, 2006). Besarnya energi ion yang diberikan, dapat diperoleh dari tegangan pemercepat yang terpasang pada tabung pemercepat. Selain itu, tegangan pemercepat ini juga dapat mengendalikan besar kecilnya energi ion (Sujitno, 2006). Ion-ion akan melekat ke permukaan substrat ketika tegangan bias dibawah 0,5 keV. Bila tegangan bias antara 0,5-1 keV akan terjadi *sputtering* (pembentukan lapisan). Sedangkan pada energi tinggi 1-100 keV akan terjadi implantasi ion. Hasilnya, ion-ion terpenetrasi ke permukaan substrat dengan kedalaman ratusan angstrom dari permukaan (Gaguk, 2012).

Dosis ion didefinisikan sebagai jumlah ion tiap cm^2 (Nastasi dan Mayer, 2006). Dalam aplikasi implan ion, nilai dosis dapat divariasikan dengan dua cara, yang pertama dengan memvariasikan arus yang mengalir sedangkan waktunya dibuat tetap. Sedangkan yang kedua, memvariasikan lamanya waktu implantasi sedangkan arus yang mengalir dibuat tetap. Banyaknya ion yang terimplantasi tiap cm^2 diberikan dengan persamaan 2.1 (Sujitno, 2006).

$$D = \frac{it}{eA} \text{ ion}/cm^2 \quad (2.1)$$

dengan

i = arus yang mengalir

t = lamanya proses implantasi (detik)

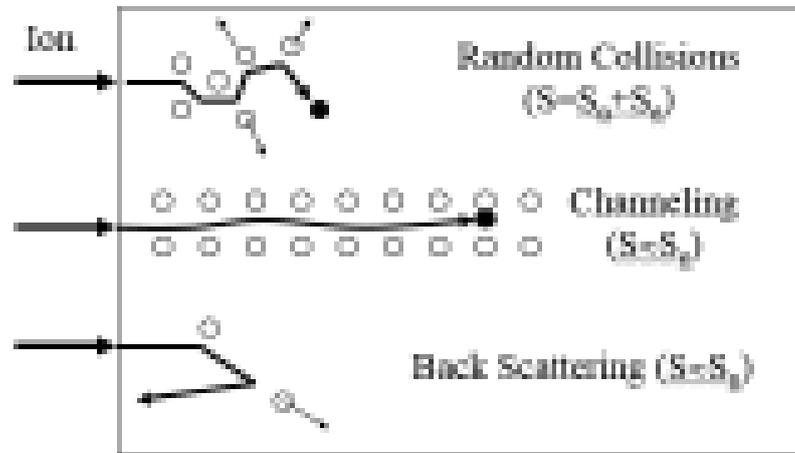
e = muatan elektron ($1,602 \times 10^{-19}$ C)

A = luas penampang (cm^2)

Implantasi ion yang dilakukan pada *range* energi ion 50 hingga 100 keV dan pada dosis ion berkisar antara interval 2×10^{17} sampai 6×10^{17} ion/ cm^2 akan menghasilkan kedalaman penyisipan kurang dari $1\mu\text{m}$. Untuk kedalaman penetrasi lapisan sekitar $5\mu\text{m}$ diperlukan energi implantasi sekitar 1 hingga 10 MeV (Gaguk, 2012).

2.3.3 Interaksi Ion dengan Permukaan

Sebuah ion yang dipercepat didalam suatu tabung akselerator mengenai suatu material/bahan akan memberikan dampak yang bermacam-macam. Menurut Pudjorahardjo *et al.* (2003) dalam Djalois (1998), menuliskan bahwa ketika suatu ion menumbuk permukaan bahan target maka akan terjadi interaksi secara makro. Interaksi secara makro tersebut berupa interaksi *ion collisions*, *channeling* dan *back scattering*. Interaksi *ion collisions* terjadi karena tumbukan secara berulang ulang antara berkas ion dengan elektron atau inti atom bahan sasaran sehingga menyebabkan berkas ion kehilangan energi kinetiknya dan berhenti pada kedalaman tertentu. Pada interaksi *channeling*, mengakibatkan penembusan bahan sasaran karena bahan sasaran tidak dapat menghentikan gerakan partikel. Sedangkan pada interaksi *back scattering* merupakan peristiwa pemantulan balik karena ion menumbuk elektron atau inti atom pada material target.



Gambar 2.7 Interaksi antara ion dengan permukaan (Hong Xiao)

Kehilangan energi berkas partikel secara matematis dapat dirumuskan (Pudjorahardjo. 2003)

$$\frac{dE}{dx} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_e + \left(\frac{dE}{dx}\right)_n = N(S_e + S_n) \quad (2.2)$$

dengan

$\frac{dE}{dx}$ = kehilangan energi total

$\left(\frac{dE}{dx}\right)_e$ = kehilangan energi elektronik

$\left(\frac{dE}{dx}\right)_n$ = kehilangan energi nuklir

N = rapat massa pusat hamburan dari target

S_e = daya hantar elektronik

S_n = daya hantar nuklir

Selain itu interaksi antara ion dengan bahan juga dapat menimbulkan efek secara mikro. Hal ini terjadi sebagai akibat dari interaksi antara ion dengan elektron dan atau inti atom sasaran. Interaksi antara ion dengan elektron dapat mengakibatkan terjadinya eksitasi dan ionisasi (Pudjorahardjo *et al.* 2003).

Eksitasi merupakan merupakan suatu keadaan dimana atom mengalami tambahan energi dari luar, sehingga elektron akan terlempar keluar ke orbit yang lebih tinggi dengan memancarkan energi foton. Sedangkan pada peristiwa ionisasi, elektron pada kulit terluar atom mengalami pelepasan karena menyerap energi dari luar.

Apabila ion yang ditembakkan mengenai inti atom, maka interaksi yang terjadi dapat berupa hamburan elastik, inelastik dan reaksi nuklir. Hamburan elastik terjadi apabila berkas ion yang ditembakkan mengalami hamburan karena adanya interaksi dengan inti atom. Namun, interaksi yang terjadi tidak sampai mengakibatkan baik berkas ion maupun inti atom mengalami eksitasi. Hamburan inelastik akan terjadi apabila interaksi diantara keduanya mengakibatkan inti atom tereskitasi diikuti pancaran sinar *gamma*. Peristiwa ini dikenal dengan dengan teknik PIGE (*Particle Induced Gamma Emission*). Reaksi nuklir juga dapat terjadi apabila tumbukan diantara keduanya mampu menghasilkan inti atom baru. Peristiwa terbentuknya inti atom baru ini digunakan sebagai salah satu cara untuk menghasilkan radioisotop (Pudjorahardjo *et al.* 2003).

2.3.4 Jangkauan Ion

Suatu ion yang ditembakkan menumbuk material atom target, akan kehilangan energi dan akan berhenti pada titik tertentu untuk menempati ruang-ruang kosong yang ditinggalkan oleh atom-atom pada material target tersebut. Kehilangan energi ini diakibatkan oleh interaksi antara berkas ion dengan inti atom sasaran dan berkas ion dengan elektron-elektron disekitar inti atom sasaran (Nastasi dan Mayer, 2006). Jarak ion dalam target yang diukur mulai dari ion

masuk target hingga berhenti di suatu lokasi secara matematis dapat dirumuskan pada persamaan 2.3 (Nastasi dan Mayer, 2006).

$$R_i(nm) = \frac{13 E_0}{\rho} \frac{1 + \frac{m_i}{m_s}}{Z_i^{2/3}} \quad (2.3)$$

dengan

m_i = massa ion dopan (sma)

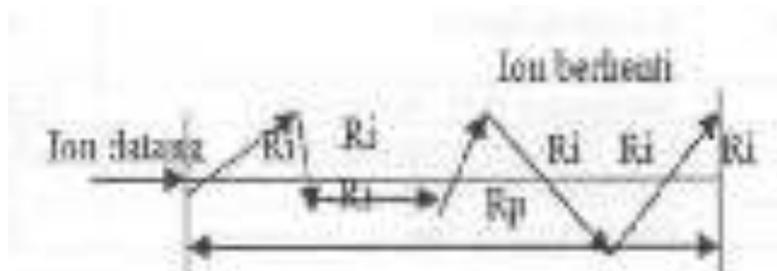
m_s = massa atom target (sma)

Z_i = nomor atom ion dopan

ρ = rapat massa target (gr/cm^3)

E_0 = energi ion datang (keV)

Bentuk lintasan ion dopan didalam materi target dapat digambarkan pada Gambar 2.8.(Sujitno, 2006).

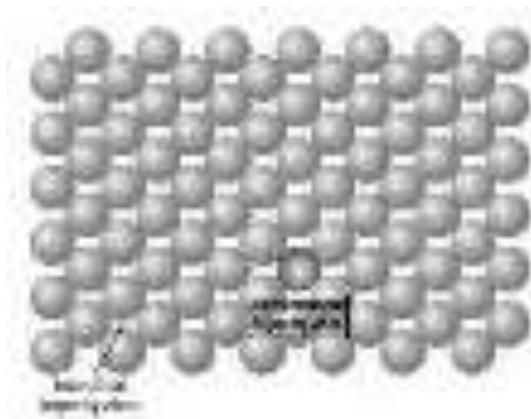


Gambar 2.8 Bentuk lintasan ion dopan dalam material target

2.4 Nitrogen Sebagai Ion Dopan

Nitrogen merupakan satu satu unsur non logam yang berada di golongan VA pada tabel periodik. Nitrogen pada besi dapat bereaksi membentuk nitrida. Pembentukan nitrida pada besi dapat meningkatkan ketahanan terhadap korosi dan kekerasan terhadap permukaan paduan besi (Sudjatmoko dkk. 2013).

Proses implantasi nitrogen pada sampel berbahan dasar besi dapat meningkatkan kekerasan besi. Hal ini dimungkinkan terjadi karena adanya faktor impuritas pada material tersebut. Impuritas pada material dapat terjadi dua jenis, substitusi dan interstisi. Proses substitusi pada material dapat terjadi apabila atom impuritas menggantikan *host atoms* karena ukurannya yang hampir sama. Sedangkan proses interstisi dapat terjadi apabila atom impuritas mengisi celah-celah/rongga diantara *host atoms*. Pada proses ini, ukuran atom impuritas memiliki ukuran yang lebih kecil dari pada ukuran *host atoms* (Callister *et al.* 2009).



Gambar 2.9 Impuritas pada zat padat

Besi merupakan logam yang mempunyai ukuran atom yang lebih besar daripada atom nitrogen. Pada proses implantasi ion nitrogen, dimungkinkan atom-atom nitrogen akan menyisip diantara atom-atom penyangga yang memiliki ukuran jauh lebih besar daripada atom nitrogen. Pembentukan mekanisme interaksi interstisi inilah yang memungkinkan untuk meningkatkan *mechanical properties* suatu bahan.

Proses implantasi nitrogen pada besi akan membentuk fase nitrida besi dengan struktur dan sifat yang berbeda-beda. Pembentukan fase baru ini akibat interaksi antara nitrogen pada besi membentuk lapisan nitrida dalam bentuk Fe_2N , Fe_3N dan Fe_4N (Sudjatmoko dkk. 2013). Pada lapisan tersebut, fasa Fe_4N merupakan fasa terbanyak dan stabil dalam fasa nitrogen-besi. Fasa ini memiliki sifat mekanik yaitu sangat keras karena memiliki struktur *face centered cubic (fcc)* dengan nilai faktor tumpukan atom (APF) sebesar 0,74. Fasa Fe_3N memiliki struktur *hexagonal closed-packed (hcp)* dengan nilai APF 0,74. Begitupun juga dengan struktur Fe_2N memiliki struktur ortorombik. Fe_3N dan Fe_2N memiliki sifat keras dan ketahanan terhadap korosi yang baik (Sudjatmoko dkk. 2010).

2.5 Kekerasan Material

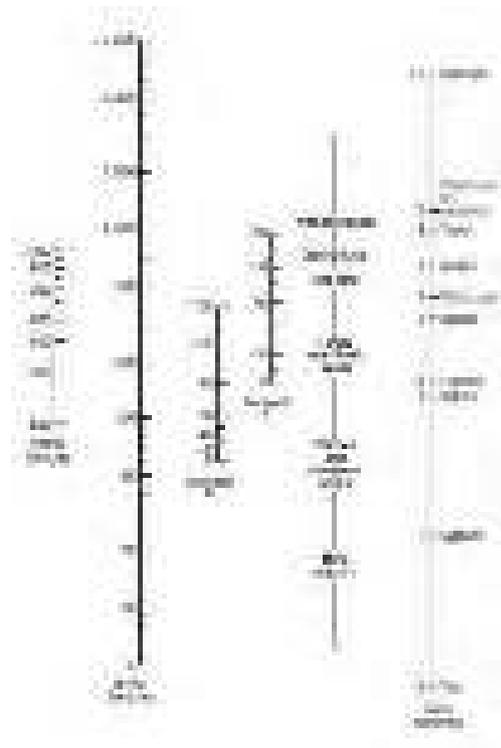
Sifat mekanik bahan yang penting untuk dipertimbangkan adalah kekerasan suatu bahan. Kekerasan suatu bahan menyatakan ketahanan suatu bahan terhadap deformasi plastis lokal (Callister, 2009). Menurut Handijaya (2000) dalam Bradbury (1991), deformasi yang terjadi merupakan kombinasi perilaku elastis dan plastis. Pada permukaan dua buah komponen yang saling bersinggungan dan bergerak satu terhadap lainnya akan terjadi deformasi elastis dan plastis.

Teknik kekerasan telah dikembangkan selama bertahun-tahun dimana sebuah indenter kecil ditekan kedalam suatu permukaan material yang akan diuji. Variasi beban pada teknik ini dapat diatur mulai dari yang paling lemah sampai pada beban keras. Kedalaman atau lekukan yang dihasilkan dapat diukur dan dinyatakan dalam satuan kekerasan. Kekerasan yang diukur bersifat relatif (tidak mutlak) sehingga

nilai yang diperoleh harus dibandingkan dengan menggunakan teknik yang berbeda. Uji kekerasan ini lebih sering dilakukan daripada uji mekanis lainnya karena beberapa hal diantaranya,

1. Lebih sederhana dan murah. Biasanya tidak ada spesimen khusus yang perlu dipersiapkan. Perangkat pengujiannya relatif murah
2. Uji ini tidak mengakibatkan spesimen menjadi rusak hingga retak atau mengalami cacat yang berlebih. Lekukan kecil adalah satu satunya deformasi yang terjadi.
3. Sifat mekanis lain sering mengacu pada data kekerasan, seperti kekuatan tarik.

Dari beberapa uji kekerasan dengan teknik yang berbeda tersebut, dibutuhkan suatu layanan yang digunakan untuk mengkonversi nilai kekerasan dari satu skala ke skala yang lain. Namun karena kekerasan bukanlah sifat bahan yang dapat terdefinisi dengan baik, dan karena adanya perbedaan-perbedaan mengenai teknik eksperimennya, skema konversi yang komprehensif belum dapat dirancang. Data konversi kekerasan ditentukan secara eksperimen dan bergantung terhadap jenis dan karakteristik bahan. Berikut ini merupakan data konversi kekerasan untuk baja dengan menggunakan metode Knoop, Brinell, dua skala Rockwell dan Mohs (Callister, 2009).



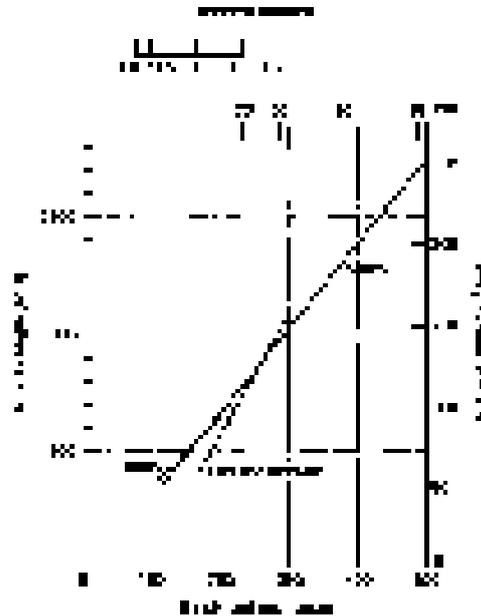
Gambar 2.10 Perbandingan skala pada beberapa metode uji kekerasan

Kekuatan tarik dan kekerasan merupakan hal yang saling berhubungan. Keduanya merupakan indikator ketahanan logam terhadap deformasi plastis. Hubungan antara keduanya dapat dijelaskan dengan persamaan 2.4 dan 2.5.

$$TS \text{ (MPa)} = 3,45 \times \text{HB} \quad (2.4)$$

$$TS \text{ (psi)} = 500 \times \text{HB} \quad (2.5)$$

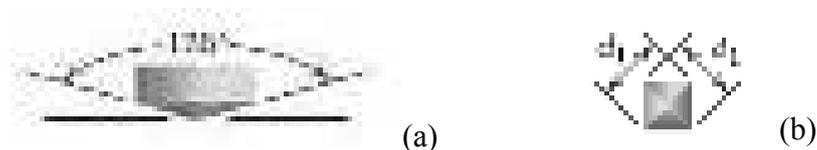
Kekuatan tarik sebagai fungsi dari HB untuk besi cor, baja dan kuningan dapat dijelaskan dengan grafik pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Hubungan antara kekerasan dan kekuatan tarik untuk besi cor, baja dan kuningan

2.6 Uji Kekerasan Material

Dalam penelitian ini uji kekerasan yang digunakan adalah *Vickers Hardness Test*. Pengujian Vickers disebut sebagai metode mikroindentasi karena pengujian dilakukan atas dasar ukuran indentor. Pengukuran Vickers dilakukan dengan melakukan penekanan pada permukaan sampel menggunakan intan piramid yang memiliki sudut kemiringan 136° seperti pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Intan piramid dari samping (a) dan dari bawah (b)

Kekerasan material dapat diukur dengan menggunakan persamaan 2.6.

$$\text{VHN} = 0,102 \frac{F^*}{S} \quad (2.6)$$

Selanjutnya dengan memasukan nilai $S = \frac{1}{2} d^2$, dan $F^* = F \sin(\theta/2)$ sehingga didapat persamaan 2.7.

$$VHN = 0,102 (2 F \sin(\theta/2) / d^2) = 0,18544 F / d^2 \quad (2.7)$$

dengan

VHN = bilangan kekerasan *Vickers*

F = beban atau gaya (N)

S = luas berkas penetrasi pada permukaan (mm^2)

d = panjang diagonal (mm)

θ = sudut kemiringan intan (136°)

Lama waktu penekanan agar didapat bentuk indentasi yang maksimal adalah selama 10 sampai 15 detik. Dengan besar beban yang diberikan sebesar 9,8 N atau setara dengan 1 kgf. Angka kekerasan Vickers (VHN) didefinisikan sebagai angka kekuatan uji dibagi dengan luas sebenarnya dari sisa hasil indentasi (kgf/mm^2). Hasil pengujian Metode Vickers biasanya ditampilkan dalam satuan SI (MPa/GPa). Untuk mengkonversi nilai kekerasan Vickers kedalam satuan SI adalah sebagai berikut (Yovanovich, 2006),

$$MPa = 9,807 \times VHN \quad (2.8)$$

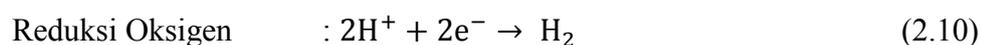
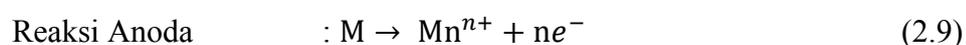
2.7 Korosi Pada Logam

Beberapa bahan material mengalami berbagai interaksi dengan kondisi lingkungan yang beragam. Seringkali, interaksi antara bahan dengan lingkungan tersebut berakibat memburuknya sifat mekanik (keuletan dan kekuatan), sifat fisik lainnya atau penampilan sehingga merusak kegunaan bahan material tersebut. Dalam

logam, keadaan semakin memburuknya sifat-sifat logam ini dikarenakan logam tersebut mengalami oksidasi dengan lingkungan sekitar. Peristiwa dinamakan sebagai korosi.

Korosi didefinisikan sebagai serangan yang merusak logam karena logam bereaksi secara elektrokimia dengan lingkungan yang biasanya dimulai dari permukaan bahan (Callister, 2009). Reaksi kimia yang terjadi berupa transfer elektron dari atom logam asal. Proses korosi yang paling umum terjadi pada besi.

Umumnya, korosi tersebut terbentuk karena bereaksi dengan air. Akan tetapi ada beberapa faktor selain air yang dapat mempengaruhi korosi (Sidiq, 2013) seperti faktor gas terlarut seperti oksigen dan karbondioksida. Adanya oksigen yang terlarut akan menyebabkan korosi pada logam. Menurut Jones (1996), reaksi elektrokimia pada proses korosi ditampilkan pada persamaan 2.9 dan 2.10.



Sedangkan pada karbondioksida, apabila karbondioksida dilarutkan dalam air, maka akan terbentuk asam karbonat (H_2CO_3) yang dapat menurunkan pH air dan meningkatkan korosifitas. Biasanya bentuk korosinya berupa korosi lekuk yang secara umum reaksinya adalah



Reaksi terbentuknya karat



2.8 Uji Korosi (*Immersion Corrosion*)

Suatu material dapat digolongkan sebagai material yang mudah berinteraksi dengan lingkungan, sebaliknya terdapat material yang sulit berinteraksi dengan lingkungannya. Besaran yang menyatakan mudah atau tidaknya suatu material berinteraksi dengan lingkungannya disebut laju korosi. Salah satu cara untuk mengetahui tingkat korosi bahan adalah dengan menghitung tingkat laju korosinya. Laju korosi merupakan perubahan massa/berat tiap satuan waktu. Atau dapat didefinisikan mudah atau tidaknya material bereaksi dengan lingkungannya. Metode yang digunakan mengetahui laju korosi material salah satunya adalah dengan metode *immersion corrosion*. Metode ini dilakukan dengan cara mencelupkan bahan uji kedalam larutan korosif. Larutan korosif pada penelitian ini yang digunakan adalah larutan SBF (*Simulated Body Fluid*) untuk menyesuaikan dengan kondisi tubuh manusia yang memiliki pH 7,4 dan suhu 37°C. Dari perlakuan tersebut akan diketahui berapa massa yang hilang dengan mengukur perbedaan massa awal sebelum pengujian dengan massa akhir sesudah pengujian. Dari uji tersebut, menurut Fredina (2013) dalam standard ASTM G31-72 (1999) nilai laju korosi akan diketahui dengan menggunakan persamaan 2.13.

$$\text{Laju Korosi } \left(\frac{\text{mm}}{\text{tahun}} \right) = \frac{K \times W}{A \times t \times D} \quad (2.13)$$

dengan K = konstanta $8,76 \times 10^4$

W = massa yang hilang selama uji korosi (gram)

A = luas permukaan (cm^2)

t = waktu korosi (jam)

D = densitas (gram/cm^3)

Berat yang hilang merupakan berat dari hasil dari pengujian korosi, nilai densitas (D) dipengaruhi oleh jenis baja yang digunakan, luasan (A) adalah luas dari seluruh permukaan baja yang digunakan, sedangkan (t) menunjukkan lamanya pengujian sampel. Nilai batas laju korosi yang diizinkan berdasarkan standar Eropa adalah 0,457 mpy (Giat dkk. 2012).

2.9 Uji Densitas

Densitas menyatakan kerapatan suatu zat yang dinyatakan dengan massa zat per satuan volume. Uji ini dilakukan untuk mengetahui kepadatan dari suatu zat. Pengujian densitas dapat dilakukan dengan menghitung perbandingan massa material di udara dengan massa material didalam air. Massa material di udara akan berbeda dengan massa material didalam air karena ketika didalam air akan timbul adanya gaya keatas atau gaya Archimedes. Pengujian ini dilakukan menurut standard ASTM A378-88. Nilai kerapatan massa sampel dapat diperoleh dari persamaan 2.14.

$$\rho_{\text{sampel}} = \frac{M_u}{M_a} \rho_{\text{air}} \quad (2.14)$$

Sedangkan untuk menghitung porositas hasil percobaan dengan menggunakan persamaan berikut

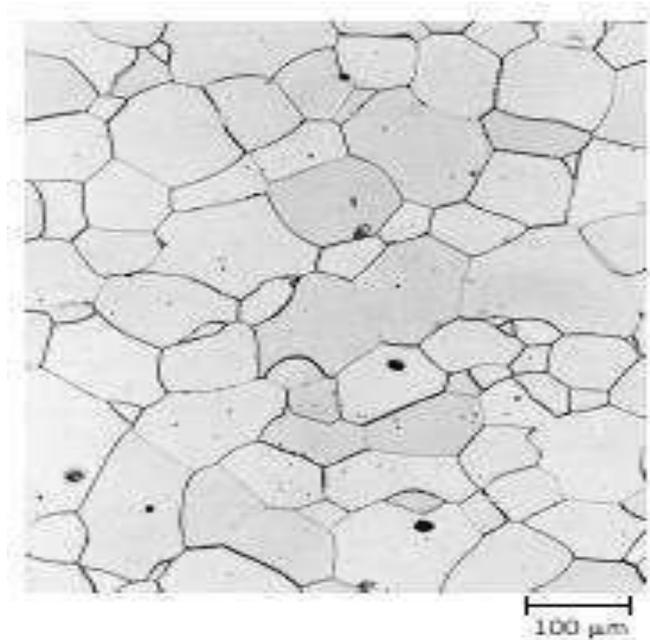
$$\% \text{Porositas} = \frac{\rho_{\text{teoritis}} - \rho_{\text{percobaan}}}{\rho_{\text{teoritis}}} \times 100 \% \quad (2.15)$$

2.10 Struktur Mikro

Sifat fisik dan mekanik suatu material dapat diamati pada struktur mikronya. Sifat mikroskopis ini dapat diobservasi salah satunya dengan menggunakan

mikroskop elektron. Struktur mikro ini bergantung dengan beberapa variabel seperti paduan unsur, konsentrasi unsur dan perlakuan panas paduan tersebut (seperti suhu, waktu pemanasan dan tingkat pendinginan pada suhu kamar) (Callister, 2009).

Pada pengamatan mikroskopis untuk paduan dua fasa, satu fasa akan terlihat terang sedangkan fasa lainnya akan terlihat gelap. Ketika hanya satu fasa yang terbentuk, tekstur permukaan sampel akan terlihat seragam. Kecuali untuk batas butir yang kemungkinan akan terlihat jelas.



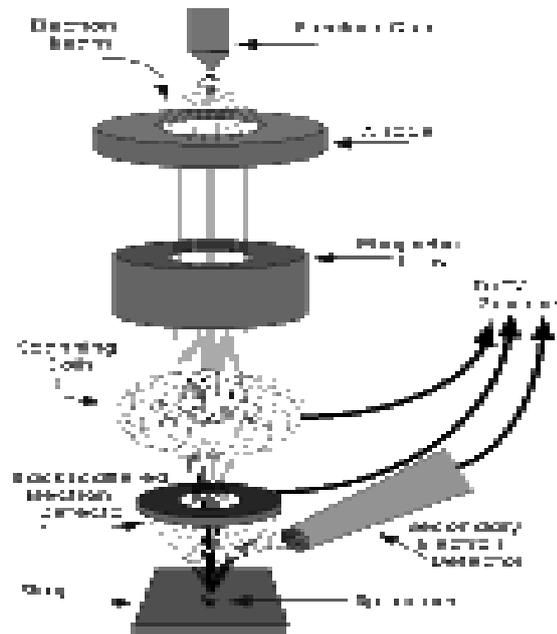
Gambar 2.13 Struktur mikro dari spesimen paduan besi-kromium dimana batas butir tampak terlihat gelap (Callister, 2009).

2.11 SEM-EDX(*Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray*)

Scanning Electron Microscope (SEM) adalah mikroskop yang menggunakan hamburan elektron dalam membentuk bayangan elektron berinteraksi dengan atom-atom yang membentuk sampel menghasilkan sinyal yang berisi tentang topografi

permukaan sampel, morfologi, komposisi dan sifat sifat lain (Fansuri dan Matianingsih, 2010). Prinsip kerja SEM adalah *scanning* yang berarti bahwa berkas elektron “menyapu” titik demi titik dengan sapuan baris demi baris. Intensitas gambar yang diterima SEM sangat berhubungan dengan bilangan atom (Z) dari sampel. Gambar yang diterima memberikan informasi tentang distribusi unsur-unsur yang berbeda dalam sampel. Penggabungan SEM dengan EDX diperlukan untuk menganalisis rasio komposisi nitrogen pada sampel hasil implantasi. Pada dasarnya, SEM-EDX merupakan pengembangan dari SEM sendiri. SEM-EDX berisi detektor dan panel operasi yang terdiri dari dua monitor.

Proses *Scanning Electron Microscope* diawali dengan elektron yang dilepaskan oleh ujung *Electron Gun* menghasilkan suatu pancaran sinar elektron kemudian difokuskan sehingga mengenai titik pada target. *Scanning coil* (koil pemindai) mengarahkan berkas elektron untuk proses pemindaian pada area kecil permukaan sampel. Hamburan kembali berkas elektron dengan sudut yang kecil (*Low angle back scattered electron*) berinteraksi dengan sebuah tonjolan pada sampel dan menghasilkan hamburan kembali (elektron sekunder) yang menghasilkan suatu sinyal elektronik selanjutnya ditangkap detektor dan kemudian diolah serta ditampilkan dalam gradasi gelap-terang pada layar monitor CRT (*Cathode Ray Tube*). Proses tersebut dapat digambarkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Skema alat SEM (Fansuri dan Martianingsih, 2010)

Dari hasil uji SEM-EDX diharapkan dapat menghasilkan tiga hal, diantaranya topografi (analisa permukaan dan tekstur), morfologi (analisa bentuk dan ukuran benda sampel dan komposisi (analisa komposisi dari sampel secara kuantitatif dan kualitatif). Selain itu diharapkan hasil uji SEM-EDX dapat diperoleh ketebalan lapisan sampel dari hasil keluarannya (Inggira, 2015).

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Fisika Material Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Airlangga untuk pengukuran densitas dan uji korosi, Laboratorium Energi Institut Teknologi Sepuluh Nopember untuk uji struktur mikro SEM-EDX, Pusat Sains dan Teknologi Akselerator Badan Tenaga Nuklir Nasional Yogyakarta untuk proses implantasi ion nitrogen pada SS 316L dan Laboratorium Pengujian Material Jurusan Teknik Industri Institut Teknologi Nasional untuk uji kekerasan. Penelitian ini dilaksanakan mulai bulan Februari 2016 hingga bulan Juni 2016.

3.2 Bahan dan Alat Penelitian

3.2.1 Bahan-bahan Penelitian

Pada penelitian ini bahan yang digunakan adalah material logam SS 316L yang banyak tersedia di pasaran. Untuk preparasi sampel yaitu pasta intan (*diamond paste*) dan alkohol. Bahan dopan nitrogen dalam bentuk gas. Untuk uji densitas bahan yang dibutuhkan aquades. Sedangkan pada uji korosi bahan-bahan yang dibutuhkan larutan yaitu larutan SBF (*Simulated Body Fluid*) dengan komposisi pada 1 liter aquades (*Hank Solution*) pada Tabel 3.1.

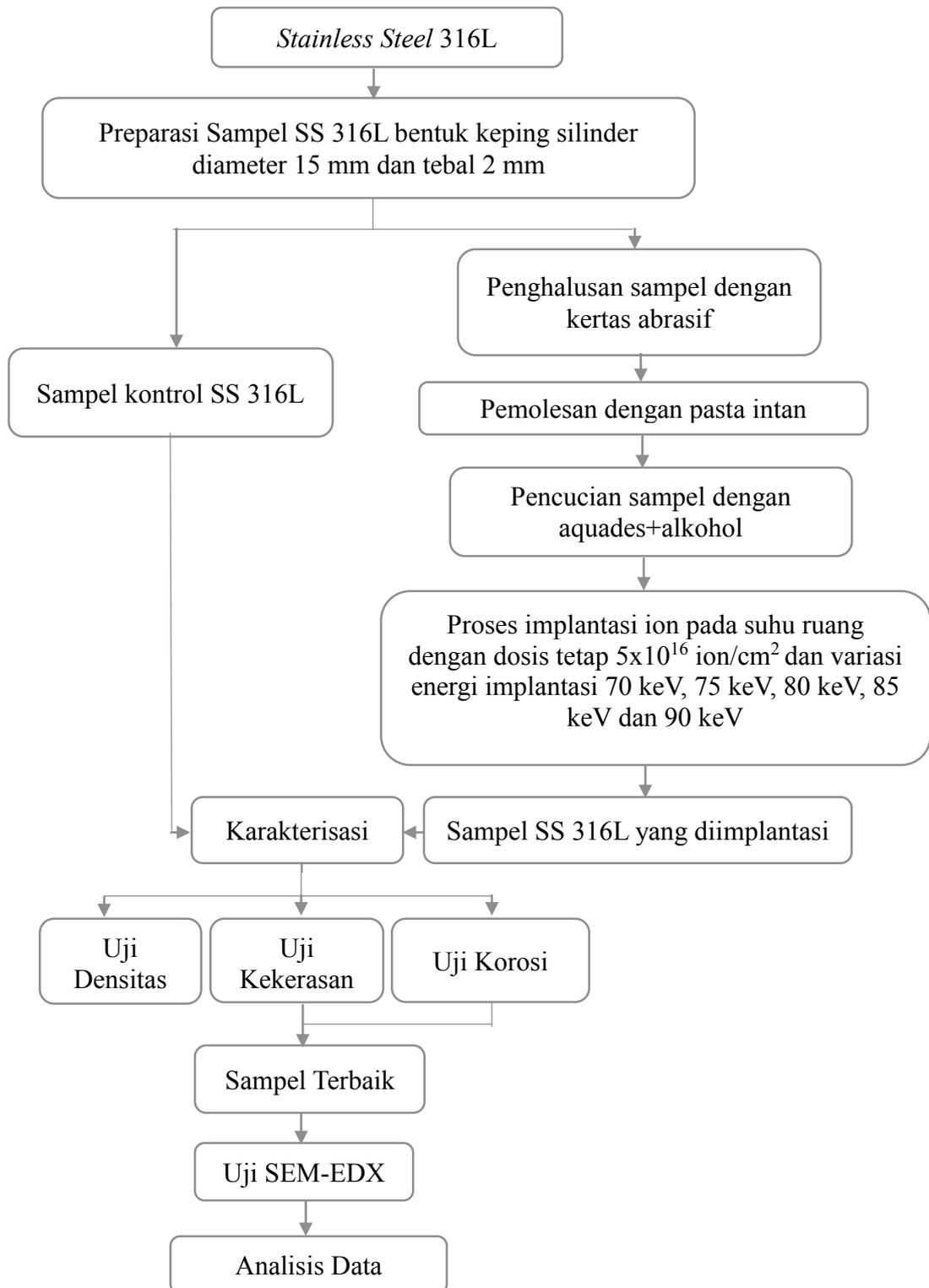
Tabel 3.1 Komposisi Larutan *Simulated Body Fluid* (Hakim. 2012)

Senyawa	gr/L
NaCl	8,0
KCl	0,4
CaCl ₂	0,72
NaHCO ₃	0,35
KH ₂ PO ₄	0,25
Na ₂ HPO ₄ .2H ₂ O	0,12
MgCl ₂	1,00
MgSO ₄ .7H ₂ O	0,06
Glukosa	1,00

3.2.2 Alat-alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam proses implantasi ion adalah implantor ion 150 keV/1mA, untuk preparasi sampel yaitu mesin bubut, kertas abrasif ukuran 600 sampai 1800. Sedangkan pada pengujian sampel alat yang digunakan *Micro Vickers Hardness*, neraca digital, *Scanning Electron Microscopy* (SEM) - EDX, *magnetic strirrer*, gelas *beaker* dan pinset.

3.3 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Pelaksanaan Penelitian

3.4 Prosedur Penelitian

3.4.1 Proses Preparasi Sampel

Bahan SS 316L yang tersedia di pasaran berbentuk batangan dipreparasi menjadi bentuk keping silinder dengan diameter 15 mm dengan tebal 2 mm. Kemudian sampel dihaluskan salah satu permukaannya dengan menggunakan kertas abrasif ukuran 600 hingga 1800 agar diperoleh permukaan yang rata. Sampel kemudian diberi pasta intan agar terlihat lebih halus dan mengkilap. Setelah itu sampel dicuci dengan aquades dan larutan alkohol untuk menghilangkan debu dan sisa serbuk serbuk abrasif sebelumnya. Hasil sampel uji dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Sampel uji

3.4.2 Proses Implantasi Ion

Sampel yang telah dipreparasi kemudian dilakukan proses implantasi ion. Suhu sampel dipertahankan dalam suhu ruang untuk mencegah terjadinya distorsi bahan. Kemudian sampel ditembakkan dengan bahan dopan nitrogen dengan variasi energi berturut turut adalah 70 keV, 75 keV, 80 keV, 85 keV dan

90 keV. Jumlah ion yang ditembakkan dipertahankan pada dosis 5×10^{16} ion/cm² dengan arus ion yang mengalir adalah 20 μ A. Diharapkan pada dosis dan arus ion tersebut dapat diperoleh hasil yang optimal. Sehingga dari perlakuan tetap tersebut, lamanya waktu implantasi untuk melakukan variasi energi tersebut dapat diketahui menggunakan persamaan 2.1.

Tabel 3.2 Data Sampel Pengujian Implantasi Ion

No	Nama Sampel	Dosis Ion	Variasi Energi
1	A0	-	-
2	A1	5×10^{16} ion/cm ²	70 keV
3	A2	5×10^{16} ion/cm ²	75 keV
4	A3	5×10^{16} ion/cm ²	80 keV
5	A4	5×10^{16} ion/cm ²	85 keV
6	A5	5×10^{16} ion/cm ²	90 keV

3.4.3 Proses Karakterisasi Sampel

3.4.3.1. Uji Densitas

Uji densitas dilakukan dengan mengukur massa sampel hasil implantasi ion dengan menggunakan neraca digital. Sampel yang telah diimplantasi ditimbang massanya di udara. Kemudian dibandingkan massanya ketika berada di dalam air. Pengujian tersebut disesuaikan dengan standar pengujian ASTM A378-88 dan dihitung nilai densitasnya dengan menggunakan persamaan 2.14.



Gambar 3.3 Neraca digital

3.4.3.2. Uji Kekerasan dengan Metode Vickers

Uji kekerasan pada penelitian menggunakan metode Vickers dengan pengambilan data yang didasarkan pada tabel Mitutoyo. Pengujian dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat mekanik bahan. Sampel sebelum dilakukan penekanan dilakukan pengamplasan terlebih dahulu dengan kertas abrasif mulai dari ukuran 500 sampai 1500. Sampel diuji dengan menggunakan seperangkat peralatan Vickers seperti yang disajikan pada Gambar 3.4.

Selanjutnya dilakukan pengujian kekerasan dengan gaya tekan 10 gf secara perlahan selama 15 detik agar terlihat jelas hasil indentasinya. Setelah gaya dihilangkan, hasil indentasi diukur rerata panjang diagonalnya kemudian dikonversikan pada tabel Mitutoyo yang dilampirkan pada Lampiran.



Gambar 3.4 Pengujian kekerasan

3.4.3.3. Uji Korosi dengan Metode *Immersion Corrosion*

Pengujian korosi dengan metode *Immersion Corrosion* dilakukan dengan menghitung berat sampel sebelum dan sesudah dilakukan implantasi ion. Sampel ditimbang dengan menggunakan neraca digital untuk mengetahui berat mula mula. Pengujian selanjutnya sampel dimasukkan kedalam larutan korosif SBF (*simulated body fluid*) dan diletakan pada *furnace* pada suhu 37 derajat Celsius yang merepresentasikan cairan tubuh manusia. Proses uji korosi ditampilkan pada Gambar 3.5.

Sampel tersebut direndam dalam larutan SBF selama 10 jam dan ditimbang dengan neraca digital untuk mengetahui berat akhir sampel. Kemudian dari data yang diperoleh, dihitung laju korosinya dengan menggunakan persamaan (2.13).



Gambar 3.5 Proses uji korosi

3.4.3.4. Uji Struktur Mikro dengan SEM-EDX

Pengujian SEM dilakukan untuk mengetahui struktur mikro yang terbentuk dari sampel hasil implantasi ion, terutama bentuk morfologi dan lapisan yang terbentuk pada permukaan sampel. Sebelum dilakukan karakterisasi SEM, dilakukan pemvakuman pada SEM-EDX jenis EVO.MA10 dilakukan pemvakuman pada tekanan 2×10^{-6} mbar selama lima menit. Selanjutnya, sampel yang akan digunakan dipersiapkan terlebih dahulu. Setelah sampel siap, sampel dimasukkan ke dalam *specimen chamber* untuk diamati struktur mikronya pada layar SEM dan dianalisis. Sampel Hasil dari SEM *image* yang akan menampilkan topografi (tekstur permukaan sampel) dan morfologinya (bentuk dan ukuran dari partikel penyusun sampel).

Penggabungan SEM dengan EDX bertujuan untuk mengetahui komposisi sampel. Hasil gambar yang telah diperoleh dari SEM kemudian dianalisis dengan EDX untuk melihat rasio nitrogen pada sampel.

Pengujian SEM-EDX pada penelitian ini menggunakan seperangkat SEM-EDX tipe EVO MA10 yang terdiri dari dua buah monitor, satu buah *keyboard* dan satu buah *mouse* seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.6



Gambar 3.6 Seperangkat SEM-EDX

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, sampel yang sudah dipreparasi dengan diameter 25 mm dan tebal 2 mm diimplantasi ion nitrogen dengan variasi energi implantasi 70 keV, 75 keV, 80 keV, 85 keV dan 90 keV dengan dosis ion dipertahankan 5×10^{16} ion/cm². Sampel hasil implantasi kemudian dikarakterisasi dengan menggunakan beberapa uji. Uji yang dilakukan meliputi uji densitas, uji kekerasan, uji korosi dan pengamatan struktur mikro menggunakan SEM-EDX. Pada bab ini, akan disajikan hasil karakterisasi yang sudah dilakukan.

4.1 Hasil Uji Densitas

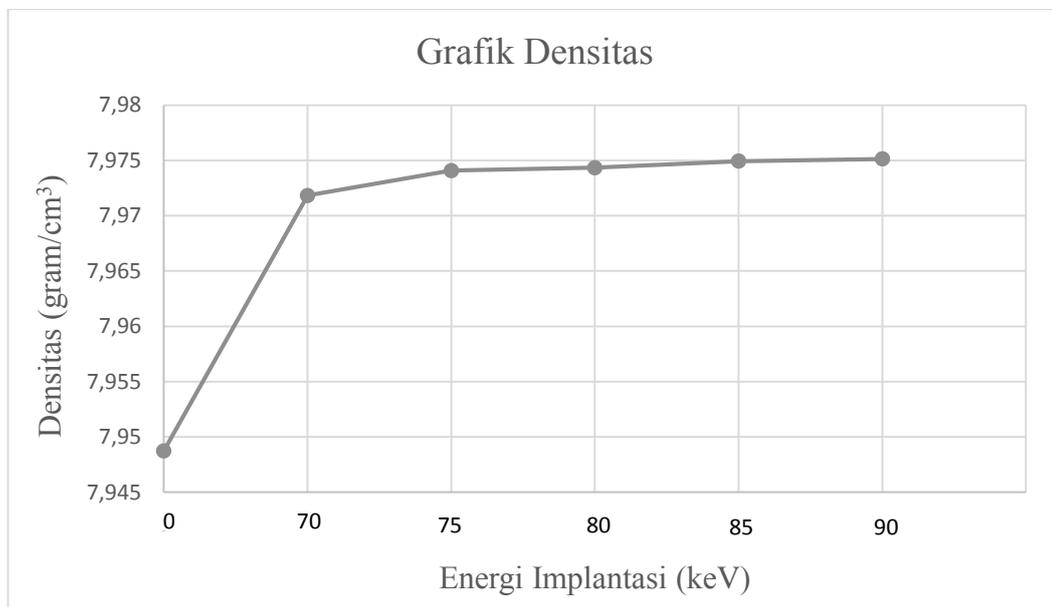
Uji densitas ini dilakukan untuk mengetahui kerapatan partikel pada suatu ruang akibat implantasi ion nitrogen. Nilai densitas tiap sampel didapatkan dengan menggunakan prinsip perbandingan massa di udara dengan massa di dalam air. Hasil uji densitas ini menentukan sifat mekanik suatu bahan, karena semakin padat suatu bahan maka semakin sedikit pula ruang-ruang kosong yang terdapat pada material tersebut.

Dari hasil uji densitas yang telah dilakukan pada sampel, diperoleh nilai yang disajikan pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Hasil uji densitas

Sampel	Variasi Energi Implantasi (keV)	Densitas (gram/cm ³)
A0	Kontrol	7,9484 ± 0,0491
A1	70	7,9718 ± 0,0229
A2	75	7,9741 ± 0,0250
A3	80	7,9743 ± 0,0068
A4	85	7,9749 ± 0,0020
A5	90	7,9751 ± 0,0020

Berdasarkan data densitas pada Tabel 4.1, dapat dibuat suatu plot grafik hubungan antara densitas suatu sampel terhadap variasi energi implantasi yang ditampilkan pada Gambar 4.1.

**Gambar 4.1** Grafik hubungan variasi energi impantasi terhadap densitas

Dari hasil pengujian densitas pada Gambar 4.1, terlihat perbedaan hasil antara sampel kontrol tanpa implantasi dengan sampel sesudah implantasi. Hal tersebut

dikarenakan pada sampel hasil implantasi yang didopan nitrogen, ion-ion nitrogen yang berukuran lebih kecil dengan diameter 56 pm akan berdifusi diantara atom-atom target (*stainless steel* 316L) yang banyak didominasi oleh atom Fe yang berukuran lebih besar (diameter 156 pm). Dengan volume yang tetap dan massa yang bertambah akibat difusi ion-ion nitrogen tersebut, ruang-ruang kosong pada material target akan terisi sehingga kerapatannya menjadi meningkat. Semakin besar nilai kerapatannya, maka sifat mekanik suatu bahan akan cenderung meningkat.

Pada Gambar 4.1, terlihat pengaruh variasi energi implantasi terhadap densitas menunjukkan grafik yang cenderung konstan. Hal ini dikarenakan jumlah dosis ion-ion nitrogen yang ditembakkan pada material target adalah tetap, walaupun energi implantasi yang ditembakkan berbeda-beda.

4.2 Hasil Uji Kekerasan

Kekerasan menggambarkan kemampuan suatu bahan untuk tahan terhadap penggoresan, pengikisan dan indentasi. Kemampuan ini terkait dengan sifat ketahanan aus (*wear resistance*) suatu material yang juga berhubungan dengan kekuatan material dalam menerima suatu beban.

Pada pengujian ini pengukuran nilai kekerasan menggunakan metode Vickers dengan beban indenter 10 gf yang memiliki bentuk dasar persegi dengan sudut 136 derajat. Sampel diindentasi dengan lama waktu penekanan selama 10 detik. Penekanan dilakukan di dua titik berbeda pada sisi tepi dan tengah sampel yang terletak pada satu garis lurus. Hasil lekukan akibat indentasi diamati pada komputer

yang terhubung dengan mikroskop dengan perbesaran 50 kali yang salah satunya dapat dilihat pada Gambar 4.2.



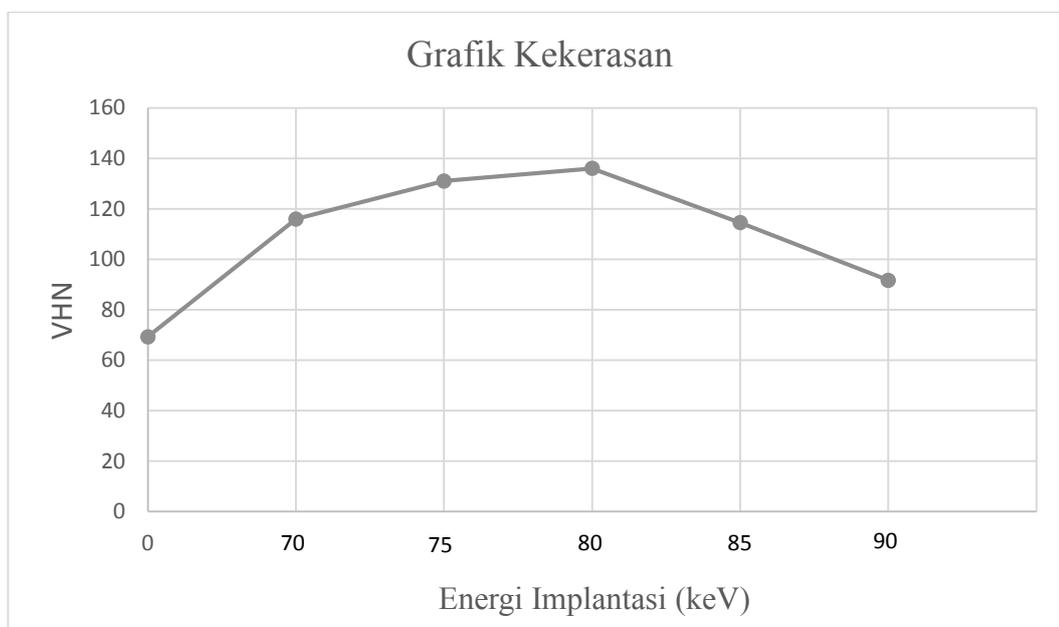
Gambar 4.2 Lekukan hasil indentasi

Dari hasil lekukan tersebut, kemudian diukur panjang kedua diagonalnya dengan menggunakan mikroskop dan diperoleh nilai kekerasan rata-rata dari dua titik dan disajikan pada Tabel 4.2

Tabel 4.2 Hasil uji kekerasan

Sampel	Variasi Energi Implantasi (keV)	Kekerasan (VHN)
A0	0	69,3 ± 0,8
A1	70	116,0 ± 1,0
A2	75	131,0 ± 1,0
A3	80	136,0 ± 2,0
A4	85	114,5 ± 5,5
A5	90	91,7 ± 6,0

Dari hasil perhitungan nilai kekerasan (pada tabel 4.2) dapat dibuat grafik hubungan antara variasi energi implantasi dengan terhadap nilai kekerasan suatu sampel dan disajikan pada Gambar 4.3



Gambar 4.3 Grafik hubungan antara variasi energi implantasi terhadap kekerasan

Pada Gambar 4.3 menunjukkan bahwa nilai kekerasan yang optimum pada sampel *stainless steel* 316L terjadi pada energi implantasi 80 keV yaitu sebesar (136 ± 2) VHN. Dari gambar tersebut juga tampak bahwa nilai kekerasan sampel mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya energi implantasi ion yang ditembakkan ke dalam sampel. Hal ini dikarenakan energi ion-ion dopan yang ditembakkan ke dalam atom-atom target mengakibatkan pergeseran atom-atom target dari letak kisi semula. Atom-atom yang tergeser juga dapat menggeser atom-atom lainnya sehingga mengakibatkan tumbukan beruntun (Sudjatmoko dkk. 1999). Peristiwa ini mengakibatkan terjadinya akumulasi ion-ion dopan yang terinterstisi (cacat kristal) ke dalam ruang-ruang kosong dari atom-atom target.

Semakin tinggi tegangan sisa ion-ion dopan yang menumbuk material target dipermukaan, maka akan semakin naik kerapatannya karena ruang-ruang kosong pada material target telah terisi. Akibatnya, atom-atom pada material target akan saling mengunci (*interlocking*) (Giat dkk. 2012).

Pada energi implantasi optimum, cacat yang terbentuk pada material target ini mempunyai tingkat kerapatan yang optimum. Atom atom pada material target juga akan semakin banyak yang saling mengunci (*interlocking*). Konsekuensi dari adanya *interlocking* ini mengakibatkan butir-butirnya menjadi tidak dapat bergerak lagi sehingga kekerasannya akan semakin naik.

Selain itu, menurut Shen dkk. (2004) kekerasan pada sampel hasil implantasi ion nitrogen tersebut mengalami peningkatan karena diyakini terbentuknya lapisan nitrida baru di lapisan modifikasi. Hal tersebut sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Sudjatmoko (2013) yang menyatakan bahwa meningkatnya sifat kekerasan pada proses implantasi ion dikarenakan pembentukan lapisan nitrida baru pada permukaan sampel. Namun pada penelitian ini, untuk mengetahui adanya lapisan nitrogen pada permukaan sampel belum dapat dibuktikan, karena tidak dilakukan pengujian XRD untuk melihat ikatan yang terbentuk dari hasil implantasi ion nitrogen tersebut.

Dari gambar Grafik 4.3 dapat dilihat nilai kekerasan mengalami penurunan pada variasi energi implantasi 85 keV dan 90 keV setelah mencapai kondisi optimum. Hal ini dikarenakan apabila energi implantasi yang diberikan semakin besar, maka akan terjadi amorfisasi pada struktur atomnya di kedalaman tertentu

(Sudjatmoko, 2000). Radiasi energi ion yang dipancarkan terlalu tinggi dibandingkan energi ikat atom-atom di permukaan material target, sehingga merusak struktur atom di lapisan permukaannya (Susita dkk. 1996). Peristiwa inilah yang mengakibatkan menurunnya nilai kekerasan pada permukaan bahan.

Dari hasil yang diperoleh tersebut menunjukkan bahwa pada energi implantasi ion yang tepatlah nilai kekerasan optimum dapat digunakan sebagai implan tulang. Sesuai dengan standar ASTM F138 kekerasan *stainless steel* 316L untuk aplikasi implan tulang mempunyai nilai maksimum 95 HRB (Park, 2007) atau dalam standar uji Vickers bernilai maksimum 210 VHN. Pada hasil uji diatas, nilai optimum kekerasan yang terjadi pada sampel dengan energi implantasi 80 keV masih dalam batas standar yang diizinkan. Namun, agar diperoleh peningkatan kekerasan yang lebih mendekati standar tersebut, dapat dilakukan peningkatan kekerasan dengan melakukan variasi dosis ion yang ditembakkan.

Ada parameter sifat mekanik lain yang berpengaruh terhadap biokompatibilitas suatu material dalam penggunaannya sebagai implan tulang. Salah satunya adalah modulus elastisitas suatu bahan yang dalam penelitian ini belum dilakukan pengujian. Modulus elastisitas ini menyatakan besarnya kemampuan suatu bahan dalam menahan beban tubuh. Pengujian modulus young dapat dilakukan dengan alat uji tarik yang bernama *autograph*. Dengan menggunakan alat tersebut, tidak hanya diperoleh nilai modulus elastisitas suatu bahan, akan tetapi juga akan diperoleh nilai *tensile strength* dari bahan tersebut.

4.3 Hasil Uji Korosi

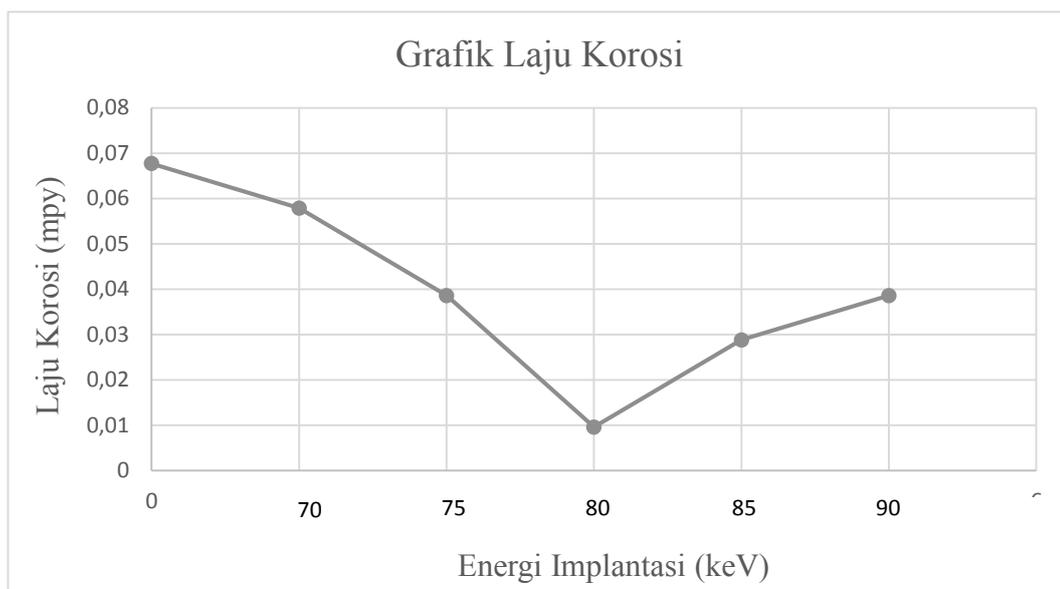
Korosi merupakan suatu proses degradasi kimia yang terjadi pada logam karena material tersebut berinteraksi dengan lingkungan. Sebagai material implan, SS 316L dalam pemakaian jangka panjang rentan terjadi korosi lokal yang menyebabkan terjadinya pelepasan ion-ion disekitar jaringan implan manusia. Hal ini dikarenakan interaksi material tersebut terhadap cairan tubuh manusia yang dalam waktu yang lama dapat menjadi larutan korosif bagi material tersebut.

Pengukuran laju korosi ini dilakukan di dalam larutan SBF (*simulated body fluid*) yang diatur pada suhu 37°C menyerupai kondisi lingkungan tubuh manusia. Pengukuran dilakukan dengan menghitung jumlah massa yang hilang setelah sampel direndam dalam larutan SBF dan dimasukkan dalam *furnace* pada suhu 37°C. Dari perlakuan tersebut diperoleh nilai laju korosi tiap sampel hasil implantasi sebagai mana disajikan pada Tabel 4.3

Tabel 4.3 Hasil uji korosi

Sampel	Variasi Energi Implantasi (keV)	Laju korosi (mm/tahun)
A0	0	0,0677 ± 0,0054
A1	70	0,0579 ± 0,0066
A2	75	0,0386 ± 0,0049
A3	80	0,0096 ± 0,0048
A4	85	0,0288 ± 0,0049
A5	90	0,0386 ± 0,0048

Dari hasil perhitungan laju korosi pada Tabel 4.3, dapat dibuat grafik hubungan antara variasi energi implantasi terhadap nilai laju korosi suatu sampel yang disajikan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.4 Grafik antara variasi energi implantasi terhadap laju korosi

Dari hasil Gambar 4.3 terlihat nilai laju korosi optimum terjadi pada variasi energi implantasi 80 keV dengan nilai laju korosi sebesar $(0,0096 \pm 0,0048)$ mm/tahun. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa nilai laju korosi akan semakin menurun seiring dengan bertambahnya energi implantasi. Hal ini dikarenakan ion nitrogen yang berukuran lebih kecil (diameter 56 pm) menempati ruang kosong pada material target yang dominan diisi oleh atom-atom Fe (diameter 156 pm). Ion dopan yang terimplantasi tersebut menyebabkan susunan atom pada material target menjadi semakin rapat. Susunan atom yang semakin rapat tersebut menjadi lapisan pelindung bagi lapisan logam dibawahnya sehingga terhindar dari

media korosif secara langsung yang menyebabkan laju korosinya menjadi semakin rendah.

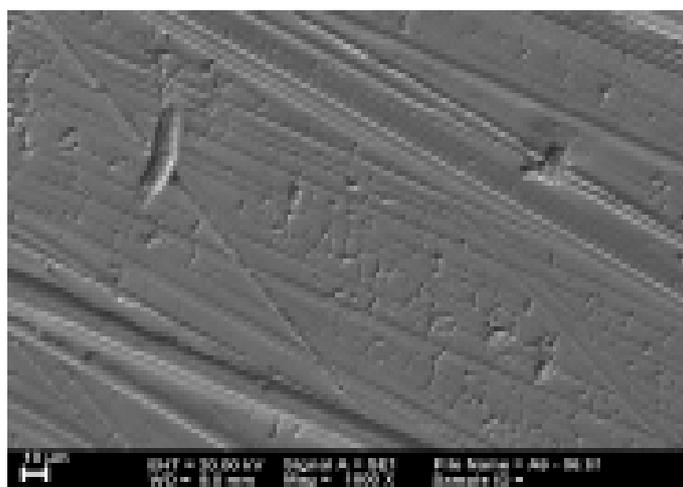
Namun pada grafik Gambar 4.4 setelah mencapai kondisi optimum, laju korosi sampel mengalami peningkatan pada variasi energi ion 85 keV dan 90 keV. Semakin naiknya laju korosi sampel setelah mencapai kondisi optimum tersebut dikarenakan pada sampel A4 dan A5 energi implantasi ion yang diberikan terlalu besar yang berakibat ion-ion dopan yang ditembakkan merusak struktur permukaan material target menjadi lapisan amorf. Permukaan lapisan yang bersifat amorf ini mudah teroksidasi (Pribadi, 2011), sehingga membuat lapisan logam dibawahnya menjadi tidak terlindungi. Apabila proses implantasi dilanjutkan dengan energi yang semakin besar, maka laju korosinya akan semakin meningkat.

Namun proses pengujian korosi dengan metode *immersion corrosion* ini kurang menunjukkan data hasil yang signifikan. Hal tersebut dikarenakan proses uji korosi *immersion corrosion* didasarkan atas berat massa yang hilang sebelum dan sesudah uji dilakukan, sedangkan *stainless steel* 316L akan memperlihatkan pengurangan yang signifikan apabila dilakukan pada waktu yang lama. Potensiotat merupakan metode pengujian korosi menggunakan alat potensiometer. Alat ini bekerja dengan mengalirkan suatu arus tertentu pada sampel untuk mengetahui nilai laju korosinya tanpa membutuhkan waktu yang lama. Data yang diperoleh akan lebih valid tanpa bergantung dengan lamanya pengujian korosi.

4.4 Hasil Uji SEM-EDX

Pengujian SEM dilakukan untuk mengetahui struktur permukaan sampel hasil implantasi ion nitrogen. Pengujian SEM dilakukan pada tegangan 20.000 Kv dengan perbesaran 1000x. Sedangkan pengujian EDX dilakukan untuk mengetahui jumlah komposisi unsur-unsur yang terkandung dalam dalam sampel, terutama keberadaan unsur nitrogen sebagai ion dopan. Pengamatan struktur mikro dengan SEM-EDX ini berfungsi untuk mengetahui keterkaitan antara bentuk morfologi permukaan dan komposisi unsur dengan sifat-sifat mekanik material hasil implantasi. Terutama untuk mendukung hasil uji densitas, uji kekerasan dan uji korosi yang telah dilakukan.

Hasil pengujian SEM-EDX dilakukan berdasarkan hasil terbaik yang diperoleh dari uji kekerasan dan uji korosi pada sampel A3 dengan energi implantasi 80 keV. Hasil tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil SEM-EDX sampel A5 pada energi implantasi 90 keV. Hasil pengujian SEM-EDX ditunjukkan pada Gambar 4.5, 4.6 dan 4.7.



Gambar 4.5 Struktur morfologi sampel dosis 5×10^{16} pada energi implantasi 80 keV

Pada penampakan struktur mikro sesudah implantasi pada gambar 4.5, memperlihatkan struktur morfologi dari permukaan *stainless steel* 316L hasil implantasi pada energi implantasi 80 keV yang terlihat kasar dengan beberapa batas domain yang mengalami cacat kristal, namun tidak terlihat begitu jelas. Hasil analisis komposisi unsur dengan menggunakan EDX yang ditampilkan pada Gambar 4.7 juga menunjukkan adanya penambahan kandungan nitrogen yang signifikan sebesar 2,2%. Kandungan nitrogen yang menyusun *stainless steel* menurut standar ASTM 2000 maksimum adalah 0,1%.

Pada gambar 4.5 tersebut juga terlihat daerah putih disekitar batas-batas domain, namun tidak terlalu terlihat jelas. Cacat kristal yang terbentuk semakin terlihat jelas pada gambar 4.6 dimana energi implantasi yang ditembakkan semakin besar.

Menurut Sudjarmoko dkk (2013), proses implantasi ion nitrogen dapat membentuk lapisan nitrida pada bagian permukaannya. Lapisan nitrida inilah yang mempengaruhi karakteristik sampel hasil implantasi. Pada uji SEM-EDX, hanya dapat membuktikan adanya peningkatan kandungan nitrogen setelah implantasi, namun belum dapat membuktikan adanya lapisan nitrida dan ikatan apa yang terbentuk pada lapisan permukaannya. Cacat kristal yang terbentuk pada lapisan permukaan *stainless steel* 316L belum tentu mengindikasikan terbentuknya lapisan nitrida, karena hal tersebut dapat saja terjadi karena proses pengecoran *stainless steel* 316L yang tidak homogen pada permukaannya. Lapisan nitrida dan ikatan yang terbentuk pada permukaan *stainless steel* 316L dapat dibuktikan secara akurat dengan menggunakan uji XRD yang dalam penelitian ini belum dilakukan. Selain

itu tidak adanya hasil pengujian SEM pada sampel kontrol mengakibatkan tidak adanya data pembandingan dari hasil SEM sesudah implantasi, sehingga informasi yang diperoleh mengenai gambaran struktur morfologi sampel hasil implantasi belum dapat diketahui.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan serangkaian penelitian, analisis dan pembahasan yang telah dilakukan mengenai pengaruh implantasi ion berbasis nitrogen dengan variasi energi implantasi diperoleh kesimpulan bahwa,

1. Variasi energi implantasi ion nitrogen berpegangaruh terhadap karakteristik *stainless steel* 316L dari sifat kekerasan dan ketahanan korosi bahan. Sedangkan pada kerapatan bahan cenderung konstan, namun mengalami peningkatan antara sebelum dan sesudah implantasi. Hal tersebut terlihat dari struktur morfologi permukaan sampel yang kasar karena mengalami cacat kristal.
2. Variasi energi implantasi terbaik dimiliki oleh sampel dengan energi implantasi 80 keV dengan masing-masing nilai kekerasan dan laju korosi optimum (136 ± 2) VHN dan sebesar ($0,0096 \pm 0,0048$) mm/tahun.

5.2 Saran

Dari hasil penelitian yang dilakukan, saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut,

1. Hasil yang diperoleh dari penelitian masih perlu dilakukan peningkatan kekerasan agar mendekati nilai kekerasan untuk implan sesuai dengan standar

ASTM F139. Dimana standar kekerasan *stainless steel* 316L berdasarkan ASTM F139 adalah 210 VHN. Hal itu dapat dilakukan dengan melakukan variasi dosis ion dopan.

2. Untuk memperoleh hasil yang lebih baik maka disarankan pada penelitian selanjutnya proses pengujian korosi dilakukan dengan menggunakan alat potensiometer sehingga didapatkan nilai ketahanan korosi yang lebih baik.
3. Untuk membuktikan terbentuknya lapisan nitrida akibat proses implantasi ion nitrogen, perlu dilakukan pengujian XRD agar fasa dan ikatan apa saja yang terbentuk dapat diketahui.
4. Perlu dilakukan pengujian tarik untuk melihat parameter lain dari sifat mekanik suatu bahan, yaitu modulus elastisitas. Hal ini diperlukan untuk melihat kemampuan suatu bahan dalam menahan beban tubuh.
5. Pada pengujian SEM, sebaiknya dilakukan pengujian sebelum dan sesudah implantasi agar dapat diperoleh perbandingan data mengenai informasi gambaran morfologi permukaan pada sampel hasil implantasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Anghelina, F.V., Ungureanu, D.N., Bratu, V., Popescu, I.N., Rusanescu, C.O., 2013, *Fine Structure Analysis of Biocompatible Ceramic Materials Based Hydroxyapatite and Metallic Biomaterials 316L*, *Journal Applied Surface Science*, 65-71.
- Arif, W.F.X. dan Dharmastiti, R., 2012, Pengaruh Implantasi Ion Berbasis Nitrogen Terhadap Kekerasan *Cobalt Chrome Alloy (COCR)*, *Seminar Nasional Sains dan Teknik*, T150-T153.
- Cahyanto, A., 2009 Makalah Biomaterial, Fakultas Kedokteran Gigi Universitas Padjajaran, Bandung.
- Callister, D.W., and David, G.R., 2009, *Materials Science and Engineering : An Introduction, Eight Edition*, John Wiley & Sons, Inc.
- Endang, W.L., 2006, Pasivasi Sebagai Pengendali Korosi Logam : *Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan dan Penerapan MIPA*, K35-K42.
- Fansuri, H., dan Martiningsih, N., 2010, Pelatihan Mikroskop Elektron: *Scanning Electron Microscope (SEM)*, Laboratorium Studi Energi dan Rekayasa ITS, Surabaya.
- Fredina, D., Sugiarti E., dan Kemas A.Z.T., 2013, Pelapisan NiCo/Cr Dengan Gabungan Teknik Elektroplating dan *Pack-Cementation* Untuk Meningkatkan Ketahanan Korosi dan Kekerasan Baja Karbon Rendah, *Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, **31**: 51-58.
- Gaguk, J., Malau, V., Ilman, M.N., Iswanto, P.T., 2011, Perbaikan Sifat Korosi Baja Tahan Karat AISI 410 Dengan Perlakuan Implantasi Ion TiN, *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Cakra M*, **5**:14-19.
- Gary, L.W. and Nut, M.J., 2002, *Stainless Steel for Medical and Surgical Applications* : ASTM International, Pennsylvania.
- Giat, S.S., Nurhamid, J., Bambang, S., Sitompul, Yuswono, 2012 Pembuatan Prototip Prostetik Sendi Lutut. *Prosiding Insinas 2012*, KO175-KO180.
- Giat, S.S., Soeharto, Rahmawati, D.I., Sujitno, T., 2012, Pengaruh Implantasi Ion Titanium Nitrium Terhadap Sifat Mekanik Biokompatibel Material AISI 316L, *Indonesian Journal of Material Sciences*, 22-26.
- Hakim, F., 2012, Biomaterial Mampu Luruh Alami Fe-Mn-C Diproduksi Melalui Metode Metalurgi Serbuk Ferromangan, Besi dan Karbon Dengan

Perlakuan Canai Dingin dan Re-Sinter, *Skripsi FT Universitas Indonesia*, Depok.

Hongxi, L., Xu Q., Jiang, Y., Wang, C., Zhang, X., 2012, *Corrosion Resistance and Mechanical Property of AZ31 Magnesium Alloy by N/Ti duplex ion implantation*, *Journal Surface & Coatings Technology*, S538-S543.

Inggira, C.K., 2015, Pengaruh Tegangan dan Waktu Proses Pelapisan Hidroksiapatit dari Tulang Sotong (*Sepia sp.*) pada Paduan Kobalt Melalui Metode EPD, *Skripsi FST Universitas Airlangga*, Surabaya.

Jujur, I.N., Sah, J., Hapsari, A.U., Mulyanto, B.S., Hakri, A., Kozin, M., 2013, Pembuatan *Stainless Steel* Dengan Bahan Baku Lokal *Ferro-Nickel* Pomalaa Menggunakan *Induction Furnace*, *Jurnal BPPT*, 9-14.

Nastasi, M., and Mayer, J.W., 2006, *Ion Implantation and Synthesis of Materials*, Springer, New York.

Nourisa, J., and Rouhi, G., 2015, *Biomechanical Evaluation of Intramedullary Nail and Bone Plate For Fixation Of Distal Metaphyseal Fractures : Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Material*, 1-12.

Park, J.B., and Brozino, J.D., 2000, *Biomaterials Principles and Applications*, CRC Press, Florida.

Park, J.B., and Lakes, R.S., 2007, *Biomaterials An Introduction : Third Edition*, Springer, New York.

Pudjorahardjo, D.S., Salam, A., dan Susita, L.R.M., 2003, Kajian Teknologi Akselerator Ion Untuk Rekayasa Bahan, *Jurnal Puslitbang Teknologi Maju-BATAN*, 5:84-91.

Shen, L.R., Wang, K., Tie, J., Tong, H.H., Chen, Q.C., Tang, D.L., Fu, R.K.Y., Chu, P.K., 2004, *Modification of High-Chromium Cast Iron Alloy by N and Ti Ion Implantation*, *Journal Surface & Coatings Technology*, 349-352.

Sidiq, F.M., 2013, Analisa Korosi dan Pengendaliannya : *Jurnal Foundry*, 3:25-30.

Sigit, H., Sudjatmoko, Pudjorahardjo, D.S., Suryadi, Usada, W., Suprpto, Djasiman, Wibowo, T., Purwadi, A., 2000, Kajian Teknologi Akselerator Tandem dan Prospeknya, 2:10-19.

Sridhar, T.M., Mudhali, U.K., and Subbaiyan, M., 2003, *Sintering Atmosphere and Temperature Effect on Hydroxyapatite coated type 316L stainless steel*, *Article in Corrosion Science*, 2337-2359.

- Sudjatmoko dan Iyos R.M.S., 2000, Karakterisasi Lapisan Nitrida Yang Terbentuk Pada Permukaan Besi Akibat Implantasi Ion Nitrogen : *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Akselerator dan Aplikasinya*, **2**:186-189.
- Sudjatmoko, 2008, Kajian Pemanfaatan Biomaterial Austenitik 316L Dalam Bidang Orthopedik, *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Akselerator dan Aplikasinya*, **10**:110 -117.
- Sudjatmoko, Sujitno T., Sulamdari, S., Susita, L.R.M., Nuraini, E., 1999, Pengaruh Implantasi Ion-Ion Boron dan Karbon Pada Sifat Mekanik Permukaan Besi, *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah P3TM-BATAN*, 9-13.
- Sudjatmoko, Susita, L.R.M., Wirjoadi, Siswanto, B., 2013, *Corrosion Resistance Improvement of AISI 316L Stainless Steel Using Nitrogen Ion Implantation*, *Ganendra Journal of Nuclear Science and Technology*, **16**:67-75.
- Sudjatmoko, Wirjoadi, Siswanto, B., Suharni, Sujitno, T., 2010, Analisis Struktur Mikro Lapisan Nitrida Besi Yang Ternitridasi Pada Permukaan Material Komponen Mesin, *Ganendra Journal of Nuclear Science and Technology*, **13**:101-111.
- Sujitno, T., 2006, Pemanfaatan Implantor Ion 150 keV/2mA Untuk *Surface Treatment*, *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya PTAPB-BATAN*, 62-69.
- Sumaryadi, 2008, Konstruksi Penggerak Catu Daya Tegangan Pemercepat Mesin Implantor Ion : *Prosiding Seminar Penelitian dan Pengelolaan Perangkat Nuklir PTAPB-BATAN*, 311-315.
- Susita, L.R.M., Sudjatmoko, Sujitno, T., Darsono, Sulamdari, S., Supardjono, 1996, Karakterisasi Struktur Mikro Stainless Steel Hasil Implantasi Ion Nitrogen, *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah PPNY-BATAN*, 50-56.
- Yovanovich, M.M., 2006. *Micro and Macro Hardness Measurements, Correlations and Contact Models. AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit*, 1-28.

Lampiran 1. Hasil Pengukuran Densitas

Tabel 1. Hasil Uji Densitas SS 316L

Sampel	Pengukuran	Massa di udara (g)	Massa di air (g)	Densitas air (g/cm ³)
A0	1	7,6524	0,9568	1
	2	7,6523	0,9687	1
A1	1	7,6372	0,9553	1
	2	7,6375	0,9608	1
A2	1	7,6318	0,9601	1
	2	7,6322	0,9541	1
A3	1	7,6742	0,9503	1
	2	7,6742	0,9745	1
A4	1	7,65	0,9595	1
	2	7,6499	0,959	1
A5	1	7,6498	0,959	1
	2	7,6496	0,959	1

Analisis Sampel

1. Sampel A0

N	Massa di udara (Mu)	Massa di air (Ma)	Mu ²	Ma ²
1	7,6524	0,9568	58,55922576	0,91546624
2	7,6523	0,9687	58,55769529	0,93837969
Σ	15,3047	1,9255	117,1169211	1,85384593

$$(M_u)_b = \langle M_u \rangle = \frac{\Sigma M_u}{N} = \frac{15,3047}{2} = 7,65235$$

$$\begin{aligned} \Delta M_{u_b} &= \sqrt{\frac{\Sigma(M_u^2) - N(M_u)^2}{N(N-1)}} \\ &= \sqrt{\frac{117,1169211 - 2(7,65235)^2}{2(2-1)}} \\ &= \sqrt{\frac{117,1169211 - 2(58,55846052)}{2}} \end{aligned}$$

$$= \sqrt{\frac{117,1169211 - 117,116921}{2}}$$

$$= \sqrt{\frac{0,0000001}{2}}$$

$$= \sqrt{0,00000005}$$

$$= 0,00023$$

$$(Ma)_b = \langle Ma \rangle = \frac{\Sigma Ma}{N} = \frac{1,9255}{2} = 0,96275$$

$$\Delta Ma_b = \sqrt{\frac{\Sigma (Ma^2) - N(Ma)^2}{N(N-1)}}$$

$$= \sqrt{\frac{1,85384593 - 2(0,96275)^2}{2(2-1)}}$$

$$= \sqrt{\frac{1,85384593 - 2(0,926887563)}{2}}$$

$$= \sqrt{\frac{1,85384593 - 1,853775125}{2}}$$

$$= \sqrt{\frac{0,000070805}{2}}$$

$$= \sqrt{0,0000354025}$$

$$= 0,00595$$

$$\rho_b = \frac{(Mu)_b}{(Ma)_b} \rho_{air} = \frac{7,65235}{0,96275} 1 = 7,948428979 \text{ gram/cm}^3$$

$$\Delta \rho_b = \sqrt{\frac{\partial \rho^2}{\partial Mu} \Delta Mu_b^2 + \frac{\partial \rho^2}{\partial Ma} \Delta Ma_b^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{Ma} \rho_{air}\right)^2 \Delta Mu_b^2 + \left(-\frac{Mu}{Ma^2} \rho_{air}\right)^2 \Delta Ma_b^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{0,96275} 1\right)^2 (0,00023)^2 + \left(-\frac{7,65235}{0,96275^2} 1\right)^2 (0,00595)^2}$$

$$= \sqrt{(1,0386912)^2 (0,00023)^2 + (-8,255963)^2 (0,00595)^2}$$

$$= \sqrt{(1,078879)(0,00000005) + (68,16092506)(0,0000354)}$$

$$= \sqrt{0,0000000539 + 0,002413067}$$

$$= \sqrt{0,00241312}$$

$$= 0,0491$$

$$\text{Jadi } \rho_b \pm \Delta\rho_b = (7,9484 \pm 0,0491) \text{ gram/cm}^3$$

2. Sampel A1

N	Massa di udara (Mu)	Massa di air (Ma)	Mu ²	Ma ²
1	7,6372	0,9553	58,32682384	0,91259809
2	7,6375	0,9608	58,33140625	0,92313664
Σ	15,2747	1,9161	116,6582301	1,83573473

$$(M_u)_b = \langle Mu \rangle = \frac{\Sigma Mu}{N} = \frac{15,3047}{2} = 7,63735$$

$$\begin{aligned} \Delta M_{ub} &= \sqrt{\frac{\Sigma(Mu^2) - N\langle Mu \rangle^2}{N(N-1)}} \\ &= \sqrt{\frac{116,6582301 - 2(7,63735)^2}{2(2-1)}} \\ &= \sqrt{\frac{116,6582301 - 2(58,32911502)}{2}} \\ &= \sqrt{\frac{116,6582301 - 116,65823}{2}} \\ &= \sqrt{\frac{0,0000009}{2}} \\ &= \sqrt{0,000000045} \\ &= 0,000212 \end{aligned}$$

$$(M_a)_b = \langle Ma \rangle = \frac{\Sigma Ma}{N} = \frac{1,9255}{2} = 0,95805$$

$$\begin{aligned} \Delta M_{ab} &= \sqrt{\frac{\Sigma(Ma^2) - N\langle Ma \rangle^2}{N(N-1)}} \\ &= \sqrt{\frac{1,83573473 - 2(0,95805)^2}{2(2-1)}} \end{aligned}$$

$$= \sqrt{\frac{1,83573473 - 2(0,917859803)}{2}}$$

$$= \sqrt{\frac{1,83573473 - 1,835719605}{2}}$$

$$= \sqrt{\frac{0,000015125}{2}}$$

$$= \sqrt{0,0000075625}$$

$$= 0,00275$$

$$\rho_b = \frac{(Mu)_b}{(Ma)_b} \rho_{air} = \frac{7,63735}{0,95805} 1 = 7,9718 \text{ gram/cm}^3$$

$$\Delta\rho_b = \sqrt{\frac{\partial \rho}{\partial Mu}^2 \Delta Mu_b^2 + \frac{\partial \rho}{\partial Ma}^2 \Delta Ma_b^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{Ma} \rho_{air}\right)^2 \Delta Mu_b^2 + \left(-\frac{Mu}{Ma^2} \rho_{air}\right)^2 \Delta Ma_b^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{0,95805} 1\right)^2 (0,000212)^2 + \left(-\frac{7,63735}{0,95805^2} 1\right)^2 (0,00275)^2}$$

$$= \sqrt{(1,0437868)^2 (0,000212)^2 + (-8,320824)^2 (0,00275)^2}$$

$$= \sqrt{(1,0894909)(0,00000005) + (69,2361120)(0,0000076)}$$

$$= \sqrt{0,0000000545 + 0,0005261945}$$

$$= \sqrt{0,0005625}$$

$$= 0,0229$$

$$\text{Jadi } \rho_b \pm \Delta\rho_b = (7,9718 \pm 0,0229) \text{ gram/cm}^3$$

3. Sampel A2

N	Massa di udara (Mu)	Massa di air (Ma)	Mu ²	Ma ²
1	7,6318	0,9601	58,24437124	0,92179201
2	7,6322	0,9541	58,25047684	0,91030681
Σ	15,264	1,9142	116,4948481	1,83209882

$$(M_u)_b = \langle Mu \rangle = \frac{\Sigma Mu}{N} = \frac{15,3047}{2} = 7,632$$

$$\Delta Mu_b = \sqrt{\frac{\Sigma(Mu^2) - N\langle Mu \rangle^2}{N(N-1)}}$$

$$= \sqrt{\frac{116,4948481 - 2(7,632)^2}{2(2-1)}}$$

$$= \sqrt{\frac{116,4948481 - 2(58,247424)}{2}}$$

$$= \sqrt{\frac{116,4948481 - 116,494848}{2}}$$

$$= \sqrt{\frac{0,0000001}{2}}$$

$$= \sqrt{0,00000005}$$

$$= 0,000224$$

$$(M_a)_b = \langle Ma \rangle = \frac{\Sigma Ma}{N} = \frac{1,9142}{2} = 0,9571$$

$$\Delta Ma_b = \sqrt{\frac{\Sigma(Ma^2) - N\langle Ma \rangle^2}{N(N-1)}}$$

$$= \sqrt{\frac{1,83209882 - 2(0,9571)^2}{2(2-1)}}$$

$$= \sqrt{\frac{1,83209882 - 2(0,91604041)}{2}}$$

$$= \sqrt{\frac{1,83209882 - 1,83208082}{2}}$$

$$= \sqrt{\frac{0,000018}{2}}$$

$$= \sqrt{0,000009}$$

$$= 0,003$$

$$\rho_b = \frac{(Mu)_b}{(Ma)_b} \rho_{air} = \frac{7,632}{0,9571} 1 = 7,9741 \text{ gram/cm}^3$$

$$\Delta \rho_b = \sqrt{\frac{\partial \rho}{\partial Mu}^2 \Delta Mu_b^2 + \frac{\partial \rho}{\partial Ma}^2 \Delta Ma_b^2}$$

$$\begin{aligned}
&= \sqrt{\left(\frac{1}{Ma} \rho_{air}\right)^2 \Delta Mu_b^2 + \left(-\frac{Mu}{Ma^2} \rho_{air}\right)^2 \Delta Ma_b^2} \\
&= \sqrt{\left(\frac{1}{0,9571} 1\right)^2 (0,000224)^2 + \left(-\frac{7,632}{0,9571^2} 1\right)^2 (0,003)^2} \\
&= \sqrt{(1,0448229)^2 (0,000224)^2 + (-8,33151)^2 (0,003)^2} \\
&= \sqrt{(1,0916549)(0,00000005) + (69,4140589)(0,000009)} \\
&= \sqrt{0,0000000546 + 0,0006247265} \\
&= \sqrt{0,000624} \\
&= 0,025
\end{aligned}$$

Jadi $\rho_b \pm \Delta\rho_b = (7,9741 \pm 0,025)$ gram/cm³

4. Sampel A3

N	Massa di udara (Mu)	Massa di air (Ma)	Mu ²	Ma ²
1	7,6745	0,9632	58,89334564	0,92775424
2	7,6745	0,9616	58,89334564	0,92467456
Σ	15,349	1,9248	117,7959005	1,8524288

$$(Mu)_b = \langle Mu \rangle = \frac{\Sigma Mu}{N} = \frac{15,349}{2} = 7,6745$$

$$\begin{aligned}
\Delta Mu_b &= \sqrt{\frac{\Sigma(Mu^2) - N\langle Mu \rangle^2}{N(N-1)}} \\
&= \sqrt{\frac{117,7959005 - 2(7,6745)^2}{2(2-1)}} \\
&= \sqrt{\frac{117,7959005 - 2(58,89795025)}{2}} \\
&= \sqrt{\frac{117,7959005 - 117,7959005}{2}} \\
&= \sqrt{\frac{0}{2}} \\
&= 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(Ma)_b &= \langle Ma \rangle = \frac{\Sigma Ma}{N} = \frac{1,9248}{2} = 0,9624 \\
\Delta Ma_b &= \sqrt{\frac{\Sigma(Ma^2) - N(Ma)^2}{N(N-1)}} \\
&= \sqrt{\frac{1,8524288 - 2(0,9624)^2}{2(2-1)}} \\
&= \sqrt{\frac{1,8524288 - 2(0,92621376)}{2}} \\
&= \sqrt{\frac{1,8524288 - 1,85242752}{2}} \\
&= \sqrt{\frac{0,00000128}{2}} \\
&= \sqrt{0,00000064} \\
&= 0,0008 \\
\rho_b &= \frac{(Mu)_b}{(Ma)_b} \rho_{air} = \frac{7,6745}{0,9624} 1 = 7,9743 \text{ gram/cm}^3 \\
\Delta \rho_b &= \sqrt{\frac{\partial \rho}{\partial Mu}^2 \Delta Mu_b^2 + \frac{\partial \rho}{\partial Ma}^2 \Delta Ma_b^2} \\
&= \sqrt{\left(\frac{1}{Ma} \rho_{air}\right)^2 \Delta Mu_b^2 + \left(-\frac{Mu}{Ma^2} \rho_{air}\right)^2 \Delta Ma_b^2} \\
&= \sqrt{\left(\frac{1}{0,9624} 1\right)^2 (0)^2 + \left(-\frac{7,6745}{0,9624^2} 1\right)^2 (0,0008)^2} \\
&= \sqrt{0 + (-8,285884)^2 (0,0008)^2} \\
&= \sqrt{(69,6558777)(0,00000064)} \\
&= \sqrt{0,0000446} \\
&= 0,00668 \\
\text{Jadi } \rho_b \pm \Delta \rho_b &= (7,9743 \pm 0,0068) \text{ gram/cm}^3
\end{aligned}$$

5. Sampel A4

N	Massa di udara (Mu)	Massa di air (Ma)	Mu ²	Ma ²
1	7,65	0,9595	58,5225	0,92064025
2	7,6499	0,959	58,52097001	0,919681
Σ	15,2999	1,9185	117,04347	1,84032125

$$(M_u)_b = \langle Mu \rangle = \frac{\Sigma Mu}{N} = \frac{15,2999}{2} = 7,64995$$

$$\Delta Mu_b = \sqrt{\frac{\Sigma(Mu^2) - N\langle Mu \rangle^2}{N(N-1)}}$$

$$= \sqrt{\frac{117,04347 - 2(7,64995)^2}{2(2-1)}}$$

$$= \sqrt{\frac{117,04347 - 2(58,521735)}{2}}$$

$$= \sqrt{\frac{117,04347 - 117,04347}{2}}$$

$$= \sqrt{\frac{0}{2}}$$

$$= 0$$

$$(M_a)_b = \langle Ma \rangle = \frac{\Sigma Ma}{N} = \frac{1,9185}{2} = 0,95925$$

$$\Delta Ma_b = \sqrt{\frac{\Sigma(Ma^2) - N\langle Ma \rangle^2}{N(N-1)}}$$

$$= \sqrt{\frac{1,84032125 - 2(0,95925)^2}{2(2-1)}}$$

$$= \sqrt{\frac{1,84032125 - 2(0,92621376)}{2}}$$

$$= \sqrt{\frac{1,84032125 - 1,84032125}{2}}$$

$$= \sqrt{\frac{0,000000125}{2}}$$

$$= \sqrt{0,0000000625}$$

$$= 0,00025$$

$$\begin{aligned} \rho_b &= \frac{(Mu)_b}{(Ma)_b} \rho_{air} = \frac{7,64995}{0,95925} 1 = 7,9749 \text{ gram/cm}^3 \\ \Delta\rho_b &= \sqrt{\frac{\partial\rho}{\partial Mu}^2 \Delta Mu_b^2 + \frac{\partial\rho}{\partial Ma}^2 \Delta Ma_b^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{Ma} \rho_{air}\right)^2 \Delta Mu_b^2 + \left(-\frac{Mu}{Ma^2} \rho_{air}\right)^2 \Delta Ma_b^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{0,95925} 1\right)^2 (0)^2 + \left(-\frac{7,64995}{0,95925^2} 1\right)^2 (0,00025)^2} \\ &= \sqrt{(-8,313712)^2 (0,00025)^2} \\ &= \sqrt{(69,117809)(0,0000000625)} \\ &= \sqrt{0,00000432} \\ &= 0,0020 \end{aligned}$$

Jadi $\rho_b \pm \Delta\rho_b = (7,9749 \pm 0,0020) \text{ gram/cm}^3$

6. Sampel A5

N	Massa di udara (Mu)	Massa di air (Ma)	Mu ²	Ma ²
1	7,6499	0,9594	58,52097001	0,92044836
2	7,6496	0,959	58,51638016	0,919681
Σ	15,2995	1,9184	117,0373502	1,84012936

$$(Mu)_b = \langle Mu \rangle = \frac{\Sigma Mu}{N} = \frac{15,2995}{2} = 7,64975$$

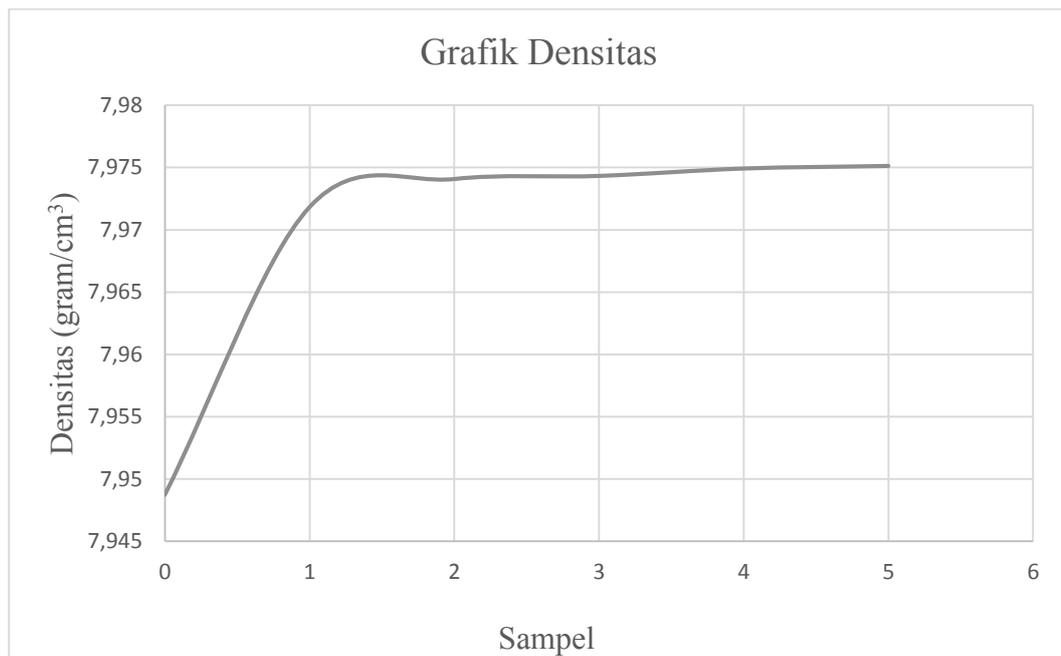
$$\begin{aligned} \Delta Mu_b &= \sqrt{\frac{\Sigma(Mu^2) - N\langle Mu \rangle^2}{N(N-1)}} \\ &= \sqrt{\frac{117,0373502 - 2(7,64975)^2}{2(2-1)}} \\ &= \sqrt{\frac{117,0373502 - 2(58,51867506)}{2}} \\ &= \sqrt{\frac{117,0373502 - 117,0373501}{2}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \sqrt{\frac{0,0000001}{2}} \\
&= \sqrt{0,00000005} \\
&= 0,000223 \\
(Ma)_b &= \langle Ma \rangle = \frac{\Sigma Ma}{N} = \frac{1,9184}{2} = 0,9592 \\
\Delta Ma_b &= \sqrt{\frac{\Sigma(Ma^2) - N(Ma)^2}{N(N-1)}} \\
&= \sqrt{\frac{1,84012936 - 2(0,9592)^2}{2(2-1)}} \\
&= \sqrt{\frac{1,84012936 - 2(0,92006464)}{2}} \\
&= \sqrt{\frac{1,84012936 - 1,84012928}{2}} \\
&= \sqrt{\frac{0,00000008}{2}} \\
&= \sqrt{0,00000004} \\
&= 0,0002 \\
\rho_b &= \frac{(Mu)_b}{(Ma)_b} \rho_{air} = \frac{7,64975}{0,9592} 1 = 7,9751 \text{ gram/cm}^3 \\
\Delta \rho_b &= \sqrt{\frac{\partial \rho}{\partial Mu}^2 \Delta Mu_b^2 + \frac{\partial \rho}{\partial Ma}^2 \Delta Ma_b^2} \\
&= \sqrt{\left(\frac{1}{Ma} \rho_{air}\right)^2 \Delta Mu_b^2 + \left(-\frac{Mu}{Ma^2} \rho_{air}\right)^2 \Delta Ma_b^2} \\
&= \sqrt{\left(\frac{1}{0,9592} 1\right)^2 (0,000223)^2 + \left(-\frac{7,64975}{0,9592^2} 1\right)^2 (0,0002)^2} \\
&= \sqrt{(1,0425354)^2 (0,000223)^2 + (-8,313712)^2 (0,00025)^2} \\
&= \sqrt{(1,0868802)(0,0000004973) + (69,117809)(0,000000625)} \\
&= \sqrt{0,000000545 + 0,00000432} \\
&= \sqrt{0,00000437} \\
&= 0,0020
\end{aligned}$$

Jadi $\rho_b \pm \Delta\rho_b = (7,9751 \pm 0,0020) \text{ gram/cm}^3$

Dari hasil analisis diatas diperoleh data-data berikut

Sampel	Densitas (gram/cm ³)
A0	7,9484 ± 0,0491
A1	7,9718 ± 0,0229
A2	7,9741 ± 0,0250
A3	7,9743 ± 0,0068
A4	7,9749 ± 0,0020
A5	7,9751 ± 0,0020



Lampiran 2. Hasil Pengukuran Kekerasan

Tabel 2. Hasil Uji Kekerasan Vickers

Sampel	Titik Pengujian	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$\bar{d}(\mu\text{m})$	VHN
A0	1	93	86	89,5	68,5
	2	89	88	88,5	70,1
A1	1	68	70	69	115
	2	67	70	68,5	117
A2	1	61	69	65	130
	2	68	61	64,5	132
A3	1	63	63	63	138
	2	67	61	64	134
A4	1	50	85	67,5	120
	2	72	70	71	109
A5	1	64	86	75	97,6
	2	76	84	80	85,7

Analisis Sampel

1. Sampel A0

Titik Pengujian	VHN	VHN ²
1	68,5	4692,25
2	70,1	4914,01
Σ	138,6	9606,26

$$(\text{VHN})_b = \langle \text{VHN} \rangle = \frac{\Sigma \text{VHN}}{N} = \frac{138,6}{2} = 69,3$$

$$\Delta \text{VHN}_b = \sqrt{\frac{\Sigma(\text{VHN}^2) - N(\text{VHN})^2}{N(N-1)}}$$

$$= \sqrt{\frac{9606,26 - 2(69,3)^2}{2(2-1)}}$$

$$= \sqrt{\frac{9606,26 - 2(4802,49)}{2}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \sqrt{\frac{9606,26 - 9604,98}{2}} \\
 &= \sqrt{\frac{1,28}{2}} \\
 &= \sqrt{0,64} \\
 &= 0,8
 \end{aligned}$$

Jadi $VHN_b \pm \Delta VHN_b = (69,3 \pm 0,8) \text{ VHN}$

2. Sampel A1

Titik Pengujian	VHN	VHN ²
1	115	13225
2	117	13689
Σ	232	26914

$$(VHN)_b = \langle VHN \rangle = \frac{\Sigma VHN}{N} = \frac{232}{2} = 116,0$$

$$\begin{aligned}
 \Delta VHN_b &= \sqrt{\frac{\Sigma(VHN^2) - N(VHN)^2}{N(N-1)}} \\
 &= \sqrt{\frac{26914 - 2(116)^2}{2(2-1)}} \\
 &= \sqrt{\frac{26914 - 2(13456)}{2}} \\
 &= \sqrt{\frac{26914 - 26912}{2}} \\
 &= \sqrt{\frac{2}{2}} \\
 &= \sqrt{1} \\
 &= 1,0
 \end{aligned}$$

Jadi $VHN_b \pm \Delta VHN_b = (116,0 \pm 1,0) \text{ VHN}$

3. Sampel A2

Titik Pengujian	VHN	VHN ²
1	130	16900
2	132	17424
Σ	262	34324

$$(\text{VHN})_b = \langle \text{VHN} \rangle = \frac{\Sigma \text{VHN}}{N} = \frac{262}{2} = 131$$

$$\Delta \text{VHN}_b = \sqrt{\frac{\Sigma(\text{VHN}^2) - N(\text{VHN})^2}{N(N-1)}}$$

$$= \sqrt{\frac{34324 - 2(131)^2}{2(2-1)}}$$

$$= \sqrt{\frac{34324 - 2(17161)}{2}}$$

$$= \sqrt{\frac{34324 - 34322}{2}}$$

$$= \sqrt{\frac{2}{2}}$$

$$= \sqrt{1}$$

$$= 1$$

Jadi $\text{VHN}_b \pm \Delta \text{VHN}_b = (131,0 \pm 1,0) \text{ VHN}$

4. Sampel A3

Titik Pengujian	VHN	VHN ²
1	138	19044
2	134	17956
Σ	272	37000

$$(\text{VHN})_b = \langle \text{VHN} \rangle = \frac{\Sigma \text{VHN}}{N} = \frac{272}{2} = 136$$

$$\begin{aligned} \Delta \text{VHN}_b &= \sqrt{\frac{\Sigma(\text{VHN}^2) - N(\text{VHN})^2}{N(N-1)}} \\ &= \sqrt{\frac{37000 - 2(136)^2}{2(2-1)}} \\ &= \sqrt{\frac{37000 - 2(18496)}{2}} \\ &= \sqrt{\frac{37000 - 36992}{2}} \\ &= \sqrt{\frac{8}{2}} \\ &= \sqrt{4} \\ &= 2,0 \end{aligned}$$

Jadi $\text{VHN}_b \pm \Delta \text{VHN}_b = (136,0 \pm 2,0) \text{ VHN}$

5. Sampel A4

Titik Pengujian	VHN	VHN ²
1	120	14400
2	109	11881
Σ	229	26281

$$(\text{VHN})_b = \langle \text{VHN} \rangle = \frac{\Sigma \text{VHN}}{N} = \frac{229}{2} = 114,5$$

$$\begin{aligned} \Delta \text{VHN}_b &= \sqrt{\frac{\Sigma(\text{VHN}^2) - N(\text{VHN})^2}{N(N-1)}} \\ &= \sqrt{\frac{26281 - 2(114,5)^2}{2(2-1)}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \sqrt{\frac{26281 - 2(13110,25)}{2}} \\
&= \sqrt{\frac{26281 - 26220,5}{2}} \\
&= \sqrt{\frac{61}{2}} \\
&= \sqrt{30,5} \\
&= 5,5
\end{aligned}$$

Jadi $VHN_b \pm \Delta VHN_b = (114,5 \pm 5,5) VHN$

6. Sampel A5

Titik Pengujian	VHN	VHN ²
1	97,6	9525,8
2	85,7	7344,5
Σ	183,3	16870,3

$$(VHN)_b = \langle VHN \rangle = \frac{\Sigma VHN}{N} = \frac{206,6}{2} = 91,7$$

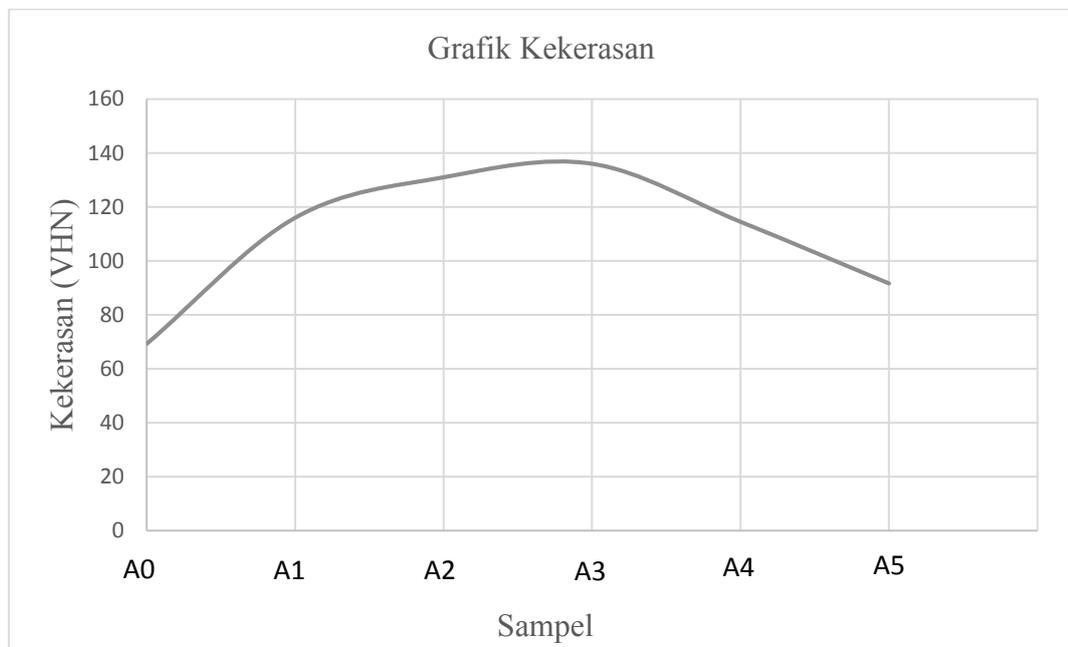
$$\begin{aligned}
\Delta VHN_b &= \sqrt{\frac{\Sigma(VHN^2) - N(VHN)^2}{N(N-1)}} \\
&= \sqrt{\frac{16870,3 - 2(91,65)^2}{2(2-1)}} \\
&= \sqrt{\frac{16870,3 - 2(8399,7225)}{2}} \\
&= \sqrt{\frac{16870,3 - 16799,445}{2}} \\
&= \sqrt{\frac{70,805}{2}} \\
&= \sqrt{35,4025}
\end{aligned}$$

=6,0

Jadi $VHN_b \pm \Delta VHN_b = (91,7 \pm 6,0)$ VHN

Dari hasil analisis diatas diperoleh data-data sebagai berikut

Sampel	VHN
A0	$69,3 \pm 0,8$
A1	$116,0 \pm 1$
A2	131 ± 1
A3	136 ± 2
A4	$114,5 \pm 5,5$
A5	$91,7 \pm 6,0$



Lampiran 3. Hasil Pengukuran Laju Korosi

Tabel 3. Hasil Uji Korosi

Sampel	Jejari (cm)	Tebal (cm)	Masa yang hilang (gram)	Waktu korosi (jam)	Densitas bahan (gram/cm ³)
A0	1,2500 ± 0,0005	0,2000 ± 0,0005	0,00070 ± 0,00005	10	7,9484 ± 0,0491
A1	1,2500 ± 0,0005	0,2000 ± 0,0005	0,00060 ± 0,00005	10	7,9718 ± 0,0229
A2	1,2500 ± 0,0005	0,2000 ± 0,0005	0,00040 ± 0,00005	10	7,9741 ± 0,0250
A3	1,2500 ± 0,0005	0,2000 ± 0,0005	0,00010 ± 0,00005	10	7,9743 ± 0,0068
A4	1,2500 ± 0,0005	0,2000 ± 0,0005	0,00030 ± 0,00005	10	7,9749 ± 0,0020
A5	1,2500 ± 0,0005	0,2000 ± 0,0005	0,00040 ± 0,00005	10	7,9751 ± 0,0020

Luas permukaan seluruh sampel

$$A_b = 2 \cdot \pi \cdot r(r + t)$$

$$= 2 \cdot 3,14 \cdot 1,25 (1,25 + 0,2)$$

$$= 7,85 (1,45)$$

$$= 11,39 \text{ cm}^2$$

$$\Delta A_b = \left| \frac{\delta A}{\delta r} \right| |\Delta r| + \left| \frac{\delta A}{\delta t} \right| |\Delta t|$$

$$= |4 \cdot \pi \cdot r + 2 \cdot \pi \cdot t| |\Delta r| + |2 \cdot \pi \cdot r| |\Delta t|$$

$$= |4 \cdot 3,14 \cdot 1,25 + 2 \cdot 3,14 \cdot 0,2| |0,0005| + |2 \cdot 3,14 \cdot 1,25| |0,0005|$$

$$= (15,7 + 1,256) 0,0005 + (7,85) 0,0005$$

$$= 0,0085 + 0,0039$$

$$= 0,0124$$

$$\text{Jadi } A_b = (11,3900 \pm 0,0124) \text{ cm}^2$$

Analisis Sampel

1. Sampel A0

Masa yang hilang (gram)	Waktu Korosi (jam)	A (cm ²)	Konstanta	Densitas bahan (gram/cm ³)
0,00070 ± 0,00005	10	11,3900 ± 0,0124	87000	7,9484 ± 0,0491

$$V_k = \frac{K.M}{A.t.D} = \frac{(87600)(0,00070)}{(11,39)(10)(7,9484)} = 0,0677 \text{ mm/tahun}$$

$$\begin{aligned} \Delta V_k &= \left| \frac{\delta V_k}{\delta M} \right| |\Delta M| + \left| \frac{\delta V_k}{\delta A} \right| |\Delta A| + \left| \frac{\delta V_k}{\delta D} \right| |\Delta D| \\ &= \left| \frac{K}{A.t.D} \right| |\Delta M| + \left| \frac{K.M}{A^2.t.D} \right| |\Delta A| + \left| \frac{K.M}{A.t.D^2} \right| |\Delta D| \\ &= \left| \frac{87600}{(11,39)(10)(7,9484)} \right| |0,00005| + \left| \frac{(87600)(0,0007)}{(7,9484)(10)(11,39)^2} \right| |0,0124| + \\ &\quad \left| \frac{(87600)(0,0007)}{(11,39)(10)(7,9484)^2} \right| |0,0491| \\ &= 0,004838 + 0,000073734 + 0,0004184 \\ &= 0,0054 \text{ mm/tahun} \end{aligned}$$

Jadi $V_k = (0,0677 \pm 0,0054) \text{ mm/tahun}$

2. Sampel A1

Masa yang hilang (gram)	Waktu Korosi (jam)	A (cm ²)	Konstanta	Densitas bahan (gram/cm ³)
0,00060 ± 0,00005	10	11,3900 ± 0,0124	87000	7,9718 ± 0,0229

$$V_k = \frac{K.M}{A.t.D} = \frac{(87600)(0,00060)}{(11,39)(10)(7,9718)} = 0,0579 \text{ mm/tahun}$$

$$\begin{aligned} \Delta V_k &= \left| \frac{\delta V_k}{\delta M} \right| |\Delta M| + \left| \frac{\delta V_k}{\delta A} \right| |\Delta A| + \left| \frac{\delta V_k}{\delta D} \right| |\Delta D| \\ &= \left| \frac{K}{A.t.D} \right| |\Delta M| + \left| \frac{K.M}{A^2.t.D} \right| |\Delta A| + \left| \frac{K.M}{A.t.D^2} \right| |\Delta D| \\ &= \left| \frac{87600}{(11,39)(10)(7,9718)} \right| |0,00005| + \left| \frac{(87600)(0,0006)}{(7,9718)(10)(11,39)^2} \right| |0,0124| + \\ &\quad \left| \frac{(87600)(0,0006)}{(11,39)(10)(7,9718)^2} \right| |0,0229| \\ &= 0,0048238 + 0,000063019 + 0,0016628 \end{aligned}$$

$$= 0,0066\text{mm/tahun}$$

$$\text{Jadi } V_k = (0,0579 \pm 0,0066) \text{ mm/tahun}$$

3. Sampel A2

Masa yang hilang (gram)	Waktu Korosi (jam)	A (cm ²)	Konstanta	Densitas bahan (gram/cm ³)
0,00040 ± 0,00005	10	11,3900 ± 0,0124	87000	7,9741 ± 0,0250

$$V_k = \frac{K.M}{A.t.D} = \frac{(87600)(0,00040)}{(11,39)(10)(7,9741)} = 0,0386\text{mm/tahun}$$

$$\begin{aligned} \Delta V_k &= \left| \frac{\delta V_k}{\delta M} \right| |\Delta M| + \left| \frac{\delta V_k}{\delta A} \right| |\Delta A| + \left| \frac{\delta V_k}{\delta D} \right| |\Delta D| \\ &= \left| \frac{K}{A.t.D} \right| |\Delta M| + \left| \frac{K.M}{A^2.t.D} \right| |\Delta A| + \left| \frac{K.M}{A.t.D^2} \right| |\Delta D| \\ &= \left| \frac{87600}{(11,39)(10)(7,9741)} \right| |0,00005| + \left| \frac{(87600)(0,0004)}{(7,9741)(10)(11,39)^2} \right| |0,0124| + \\ &\quad \left| \frac{(87600)(0,0004)}{(11,39)(10)(7,9741)^2} \right| |0,025| \\ &= 0,00482246 + 0,000042 + 0,000048777 \\ &= 0,0049 \text{ mm/tahun} \end{aligned}$$

$$\text{Jadi } V_k = (0,0386 \pm 0,0049) \text{ mm/tahun}$$

4. Sampel A3

Masa yang hilang (gram)	Waktu Korosi (jam)	A (cm ²)	Konstanta	Densitas bahan (gram/cm ³)
0,00010 ± 0,00005	10	11,3900 ± 0,0124	87000	7,9743 ± 0,0068

$$V_k = \frac{K.M}{A.t.D} = \frac{(87600)(0,00010)}{(11,39)(10)(7,9743)} = 0,0096\text{mm/tahun}$$

$$\begin{aligned} \Delta V_k &= \left| \frac{\delta V_k}{\delta M} \right| |\Delta M| + \left| \frac{\delta V_k}{\delta A} \right| |\Delta A| + \left| \frac{\delta V_k}{\delta D} \right| |\Delta D| \\ &= \left| \frac{K}{A.t.D} \right| |\Delta M| + \left| \frac{K.M}{A^2.t.D} \right| |\Delta A| + \left| \frac{K.M}{A.t.D^2} \right| |\Delta D| \\ &= \left| \frac{87600}{(11,39)(10)(7,9743)} \right| |0,00005| + \left| \frac{(87600)(0,0001)}{(7,9743)(10)(11,39)^2} \right| |0,0124| + \\ &\quad \left| \frac{(87600)(0,0001)}{(11,39)(10)(7,9743)^2} \right| |0,0068| \end{aligned}$$

$$= 0,004822 + 0,000010499 + 0,000008224$$

$$= 0,0048 \text{ mm/tahun}$$

Jadi $V_k = (0,0096 \pm 0,0048) \text{ mm/tahun}$

5. Sampel A4

Masa yang hilang (gram)	Waktu Korosi (jam)	A (cm ²)	Konstanta	Densitas bahan (gram/cm ³)
0,00030 ± 0,00005	10	11,3900 ± 0,0124	87000	7,9749 ± 0,0020

$$V_k = \frac{K.M}{A.t.D} = \frac{(87600)(0,00030)}{(11,39)(10)(7,9749)} = 0,0288 \text{ mm/tahun}$$

$$\begin{aligned} \Delta V_k &= \left| \frac{\delta V_k}{\delta M} \right| |\Delta M| + \left| \frac{\delta V_k}{\delta A} \right| |\Delta A| + \left| \frac{\delta V_k}{\delta D} \right| |\Delta D| \\ &= \left| \frac{K}{A.t.D} \right| |\Delta M| + \left| \frac{K.M}{A^2.t.D} \right| |\Delta A| + \left| \frac{K.M}{A.t.D^2} \right| |\Delta D| \\ &= \left| \frac{87600}{(11,39)(10)(7,9749)} \right| |0,00005| + \left| \frac{(87600)(0,0003)}{(7,9749)(10)(11,39)^2} \right| |0,0124| + \\ &\quad \left| \frac{(87600)(0,0003)}{(11,39)(10)(7,9749)^2} \right| |0,002| \\ &= 0,0048257 + 0,00003149 + 0,000007255 \\ &= 0,0049 \text{ mm/tahun} \end{aligned}$$

Jadi $V_k = (0,0288 \pm 0,0049) \text{ mm/tahun}$

6. Sampel A5

Masa yang hilang (gram)	Waktu Korosi (jam)	A (cm ²)	Konstanta	Densitas bahan (gram/cm ³)
0,00040 ± 0,00005	10	11,3900 ± 0,0124	87000	7,9751 ± 0,0020

$$V_k = \frac{K.M}{A.t.D} = \frac{(87600)(0,00040)}{(11,39)(10)(7,9751)} = 0,0386 \text{ mm/tahun}$$

$$\begin{aligned} \Delta V_k &= \left| \frac{\delta V_k}{\delta M} \right| |\Delta M| + \left| \frac{\delta V_k}{\delta A} \right| |\Delta A| + \left| \frac{\delta V_k}{\delta D} \right| |\Delta D| \\ &= \left| \frac{K}{A.t.D} \right| |\Delta M| + \left| \frac{K.M}{A^2.t.D} \right| |\Delta A| + \left| \frac{K.M}{A.t.D^2} \right| |\Delta D| \end{aligned}$$

$$= \left| \frac{87600}{(11,39)(10)(7,9751)} \right| |0,00005| + \left| \frac{(87600)(0,0004)}{(7,9751)(10)(11,39)^2} \right| |0,0124| +$$

$$\left| \frac{(87600)(0,0004)}{(11,39)(10)(7,9751)^2} \right| |0,002|$$

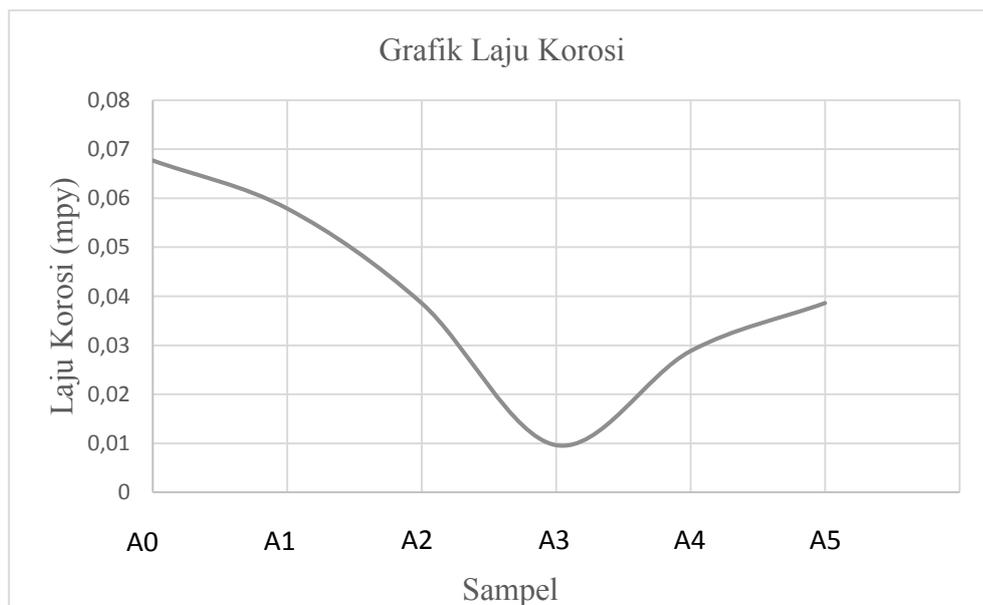
$$= 0,00482185 + 0,000042023 + 0,000009674$$

$$= 0,0048 \text{ mm/tahun}$$

Jadi $V_k = (0,0386 \pm 0,0048)$ mm/tahun

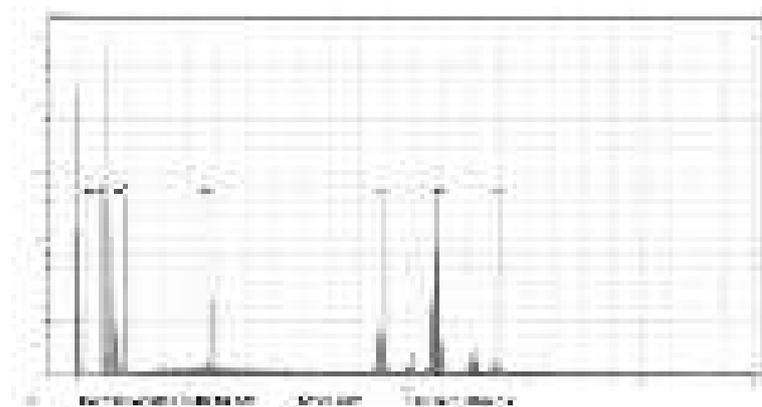
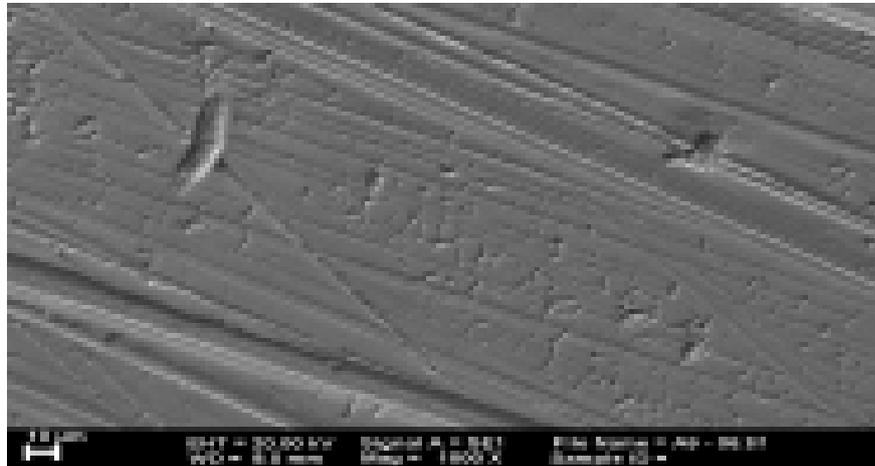
Dari hasil analisis diatas diperoleh data-data sebagai berikut

Sampel	Laju korosi (mm/tahun)
A0	0,0677 ± 0,0054
A1	0,0579 ± 0,0066
A2	0,0386 ± 0,0049
A3	0,0096 ± 0,0048
A4	0,0288 ± 0,0049
A5	0,0386 ± 0,0048



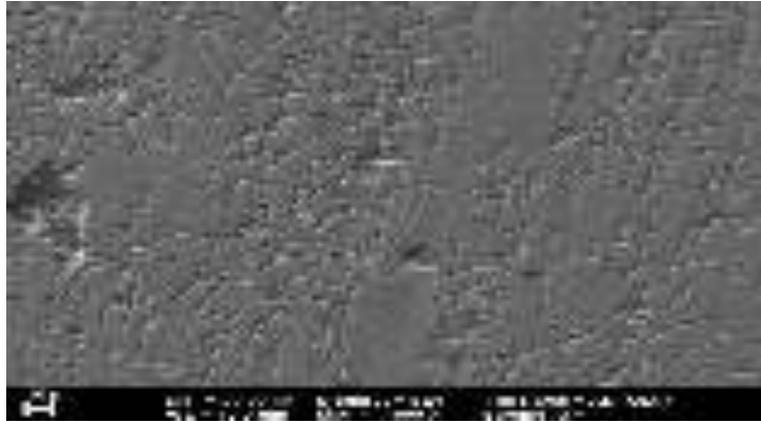
Lampiran 4. Hasil Pengujian SEM-EDX

1. Hasil SEM-EDX pada sampe A3 dengan variasi energi implantasi 80 keV



Element	Weight %	Atomic %	Weight %	Atomic %
Fe	54.21	41.12	54.21	41.12
Si	28.15	21.12	28.15	21.12
Al	12.34	9.45	12.34	9.45
O	4.12	3.12	4.12	3.12
C	1.16	0.89	1.16	0.89

2. Hasil SEM pada sampe A5 dengan variasi energi implantasi 90 keV



Lampiran 5. Dokumentasi Penelitian



Plat SS 316L



Pemotongan Sampel



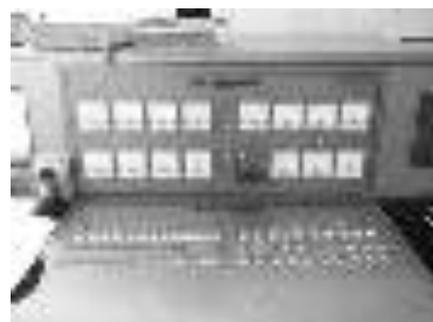
Penghalusan Sampel



Pencucian Sampel



Sampel



Alat Kendali Implantor Ion



Implantor Ion



Neraca Digital



Seperangkat Micro Vickers Hardness



Sampel yang akan diuji korosi



Furnace



Sampel dalam larutan SBF

Tabel Konversi Kekerasan Vickers Metode Mitutoyo

Vickers Hardness Number (Test Load 98,07 mN/0,01kgf)										
a	0.0	0.5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
15	2439	2284	2144	2016	1899	1792	1694	1603	1520	1443
20	1382	1306	1244	1187	1134	1084	1037	994	953	914
25	878	844	812	781	753	726	700	676	653	631
30	610	590	571	553	536	520	504	489	475	461
35	448	435	423	412	401	390	380	370	361	352
40	343	335	326	319	311	304	297	290	283	277
45	271	265	259	254	248	243	238	233	229	224
50	220	215	211	207	203	199	195	192	188	185
55	181	178	175	172	169	166	163	160	158	155
60	152	150	147	145	143	140	138	136	134	132
65	130	128	126	124	122	120	119	117	115	114
70	112	110	109	107	106	104	103	102	100	98,9
75	97,6	96,3	95	93,8	92,6	91,4	90,2	89,1	87,9	96,8
80	85,7	84,7	83,6	82,6	81,6	80,6	79,7	78,7	77,8	76,9
85	76	75,1	74,2	73,3	72,5	71,7	70,9	70,1	69,3	68,5
90	67,7	67	66,3	65,5	64,8	64,1	63,4	62,8	62,1	61,5
95	60,8	60,2	59,5	58,9	58,3	57,7	57,1	56,6	56	55,4
100	54,9	54,3	53,8	53,3	52,7	52,2	51,7	51,2	50,7	50,3
105	49,8	49,3	48,8	48,4	47,9	47,5	47	46,6	46,2	45,8
110	45,4	44,9	44,5	44,1	43,7	43,4	43	42,6	42,2	41,9
115	41,5	41,1	40,8	40,4	40,1	39,7	39,4	39,1	38,8	38,4
120	38,1	37,8	37,5	37,2	36,9	36,6	36,3	36	35,7	35,4
125	35,1	34,8	34,6	34,3	34	33,8	33,5	33,2	33	32,7
130	32,5	32,2	32	31,7	31,5	31,3	31	30,8	30,6	30,3
135	30,1	29,9	29,7	29,5	29,2	29	28,8	28,6	28,4	28,2
140	28	27,8	27,6	27,4	27,2	27	26,8	26,6	26,5	26,3
145	26,1	25,9	25,7	25,6	25,4	25,2	25,1	24,9	24,7	24,6
150	24,4	24,2	24,1	23,9	23,8	23,6	23,4	23,3	23,1	23
155	22,8	22,7	22,5	22,4	22,3	22,1	22	21,8	21,7	21,6

Vickers Hardness Number (Test Load 98,07 mN/0,01kgf)										
a	0.0	0.5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
160	21,4	21,3	21,2	21	20,9	20,8	20,7	20,5	20,4	20,3
165	20,2	20	19,9	19,8	19,7	19,6	19,4	19,3	19,2	19,1
170	19	18,9	18,8	18,7	18,5	18,4	18,3	18,2	18,1	18
175	17,9	17,8	17,71	17,6	17,5	17,4	17,3	17,2	17,1	17
180	16,9	16,8	16,8	16,7	16,6	16,5	16,4	16,3	16,2	16,1
185	16	15,9	15,9	15,8	15,7	15,6	15,5	15,4	15,4	15,3
190	15,2	15,1	15	15	14,9	14,8	14,7	14,7	14,6	14,5
195	14,4	14,4	14,3	14,2	14,1	14,1	14	13,9	13,9	13,8
200	13,7	13,7	13,6	13,5	13,4	13,4	13,3	13,3	13,2	13,1
205	13,1	13	12,9	12,9	12,8	12,7	12,7	12,6	12,6	12,5
210	12,4	12,4	12,3	12,3	12,2	12,2	12,1	12	12	11,9
215	11,9	11,8	11,8	11,7	11,7	11,6	11,5	11,5	11,4	11,4
220	11,3	11,3	11,2	11,2	11,1	11,1	11	11	10,9	10,9
225	10,8	10,8	10,7	10,7	10,6	10,6	10,6	10,5	10,5	10,4
230	10,4	10,3	10,3	10,2	10,2	10,2	10,1	10,1	10	10