BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. PLASMA RF LUCUTAN PIJAR

2.1.1. Definisi Plasma

Plasma merupakan fase materi ke empat setelah padat, cair dan gas. Plasma didefinisikan sebagai gas terionisasi dalam keadaan kuasinetral *(quasineutral)* dari partikel bermuatan dan partikel netral yang menunjukkan fenomena kolektif *(collective behavior)*.

> *"A plasma is a quasineutral gas of charged and neutral particles which exhibits collective behavior."* (Francis, 1977)

Tidak semua gas terionisasi dapat dikatakan plasma, sebab plasma mempunyai syarat-syarat tertentu, seperti misalnya panjang Debye harus jauh lebih kecil dibanding panjang sistem reaktor. Sebagai contoh, plasma yang dihasilkan dari sistem lucutan pijar mempunyai kerapatan (n) antara 10^{8} cm^{-3} sampai 10^{10} cm^{-3}, panjang Debye (λ_D) lebih dari 10^{-3} cm dan energi (kT_e) kira-kira 1 eV. Hubungan antara panjang Debye, kerapatan dan suhu plasma dapat dirumuskan sebagai berikut: (Francis, 1977)

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_o k T_e}{n_e e^2}} \qquad (2\text{-}1)$$

dengan : λ_D = panjang Debye (m)

k = konstanta Boltzman ($1{,}38 \times 10^{-23}$ JK^{-1})

T_e = temperatur elektronik (K)

n_e = kerapatan elektronik (m^{-3})

e = muatan elektronik ($1{,}6 \times 10^{-14}$ C)

ε_o = permitivitas hampa ($8{,}854 \times 10^{-12}$ C^2Nm^{-2})

Keadaan kuasinetral adalah keadaan gas terionisasi dimana rapat ion hampir sama dengan rapat elektron, sehingga dapat dikatakan $n_i \approx n_e \approx n$, dimana n menyatakan kepadatan secara umum yang disebut rapat plasma (*plasma density*). Keadaan seperti ini dapat dikatakan netral tetapi tidak terlalu netral (Francis, 1977). Sedangkan yang dimaksud dengan *collective behaviour* adalah suatu kondisi yang sangat kompleks dimana proses-proses atomis seperti ionisasi, eksitasi dan rekombinasi terjadi dalam waktu yang hampir bersamaan. Selain itu proses terbentuknya plasma juga menunjukkan adanya partikel-partikel gas yang bermuatan sehingga gerakannya cukup komplek akibat adanya interaksi antara partikel yang saling berdekatan maupun dengan partikel yang berjauhan.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

2.1.2. Proses Pembentukan Plasma Radio Frekuensi Lucutan Pijar

Plasma terbentuk karena adanya ionisasi gas yang berada diantara dua elektroda yang dihubungkan dengan medan radio frekuensi yang ditimbulkan oleh osilator radio frekuensi. Osilator radio frekuensi yaitu osilator yang memberikan getaran elektromagnetik pada daerah frekuensi radio (antara 0,3 MHz sampai 300 MHz). Proses ionisasi pada gas dapat berlangsung dengan dua cara, yaitu:

1. Proses ionisasi karena penyerapan energi elektromagnetik yang menyebabkan transisi tingkat-tingkat energi atom,
2. Proses ionisasi yang terjadi karena adanya tumbukan antar partikel.

Proses ionisasi yang terjadi karena adanya penyerapan energi foton yang dipancarkan gelombang elektromagenetik oleh gas mengakibatkan partikel-partikel gas tertransfer dari keadaan normal ke keadaan tereksitasi. Jika energi foton yang datang melebihi energi ionisasi partikel gas, maka elektron akan terlepas dari ikatannya dan partikel gas menjadi bermuatan positif. Proses ini biasa disajikan sebagai persamaan berikut: (Beiser, 1991)

$$h\upsilon = K_{max} + h\upsilon_o \qquad (2\text{-}3)$$

dengan υ = frekuensi foton yang datang

υ_o = frekuensi ambang ionisasi

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

K_{max} = energi kinetik fotoelektron maksimum

h = konstanta Planck (6.626×10^{-34} Js)

Proses ionisasi juga dapat terjadi karena adanya tumbukan antara elektron-elektron bebas dengan partikel-partikel gas. Proses tumbukan ini selain menyebabkan terjadinya ionisasi, juga menyebabkan peristiwa-peristiwa seperti terlihat pada tabel berikut:

Tabel 2-1. Interaksi elektron-partikel gas.

$e + N_2$	——>	$N + N$	dissosiasi
$e + N_2$	——>	$N_2^* + e$	eksitasi molekul
$e + N$	——>	$N^* + e$	eksitasi atom
$e + N_2$	——>	$N_2^+ + 2e$	ionisasi molekul
$e + N$	——>	$N^+ + 2e$	ionisasi atom
$2e + N_2^+$	——>	N_2	rekombinasi molekul
$2e + N^+$	——>	N	rekombinasi atom
$e + N_2$	——>	$N_2 + e + h\nu$	relaksasi molekul
$e + N_2$	——>	$N + e + h\nu$	relaksasi atom

Ionisasi adalah proses terlepasnya elektron partikel gas dari ikatannya. Partikel gas yang kehilangan elektron tersebut akan bermuatan positif yang disebut ion. Kebalikan dari proses ionisasi disebut rekombinasi. Rekombinasi terjadi dengan cara mengikat elektron sehingga menjadi partikel yang netral kembali.

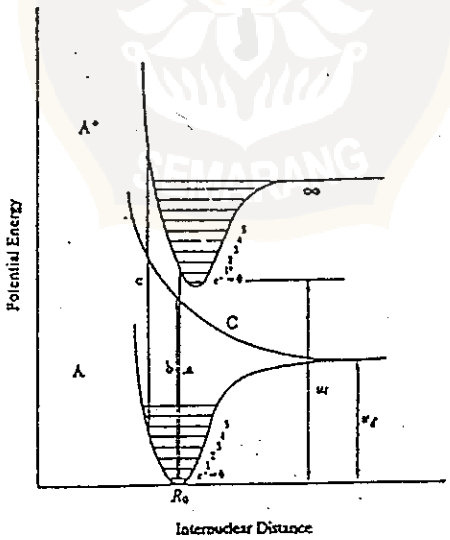
Dissosiasi adalah pemisahan molekul-molekul menjadi

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

atom-atom penyusunnya. (Marr, 1967). Partikel gas yang terdissosiasi ini dapat pula terionisasi menjadi ion-ion positif dan negatif.

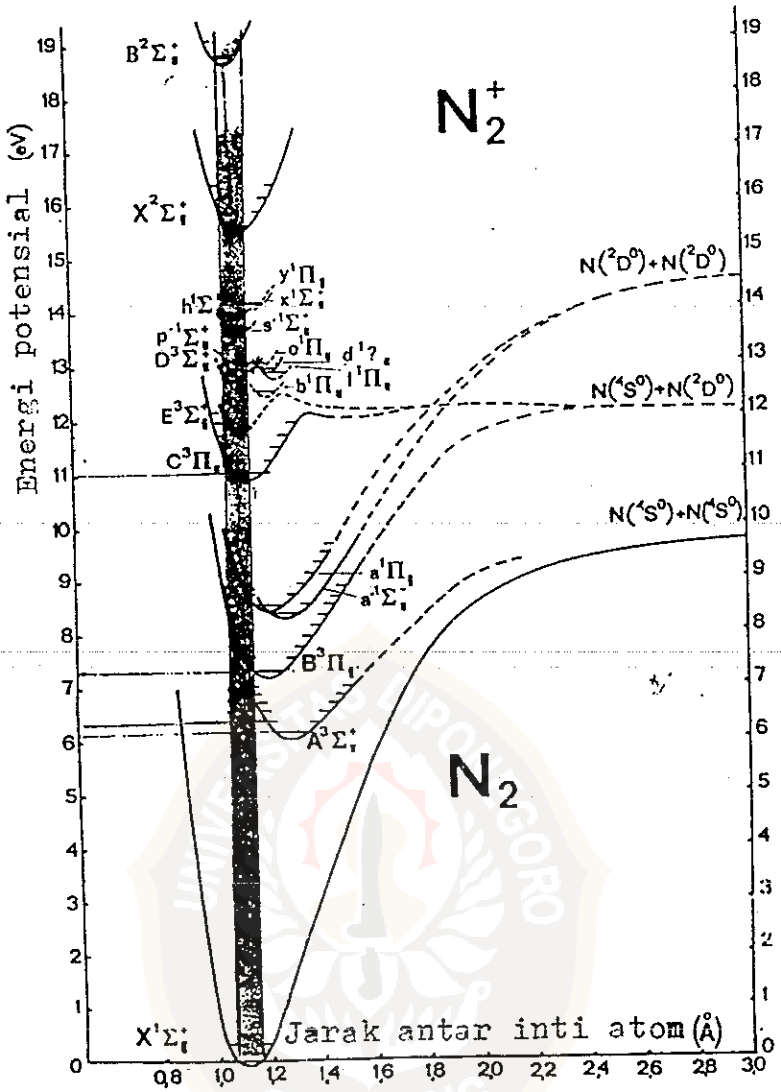
Eksitasi adalah peristiwa dimana elektron yang berada di tingkat energi yang lebih rendah berpindah ke tingkat energi yang lebih tinggi dengan menyerap energi tumbukannya dengan elektron. Peristiwa kebalikan dari eksitasi disebut relaksasi yang mana pada peristiwa relaksasi ini disertai dengan pengeluaran energi foton.

Untuk menggambarkan besar energi potensial dari sebagian proses tersebut di atas, kita perhatikan diagram energi potensial pada Gambar 2-1.



Gambar 2.1. Eksitasi, ionisasi dan dissosiasi dari molekul (μ_i = energi ionisasi, μ_d = energi dissosiasi termal). (Konuma, 1992)

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)



Gambar 2.2. Diagram energi potensial molekul N_2 dan N_2^+

Pada tahun 1929, Morse mengusulkan sebuah formula analitik sebagai berikut:

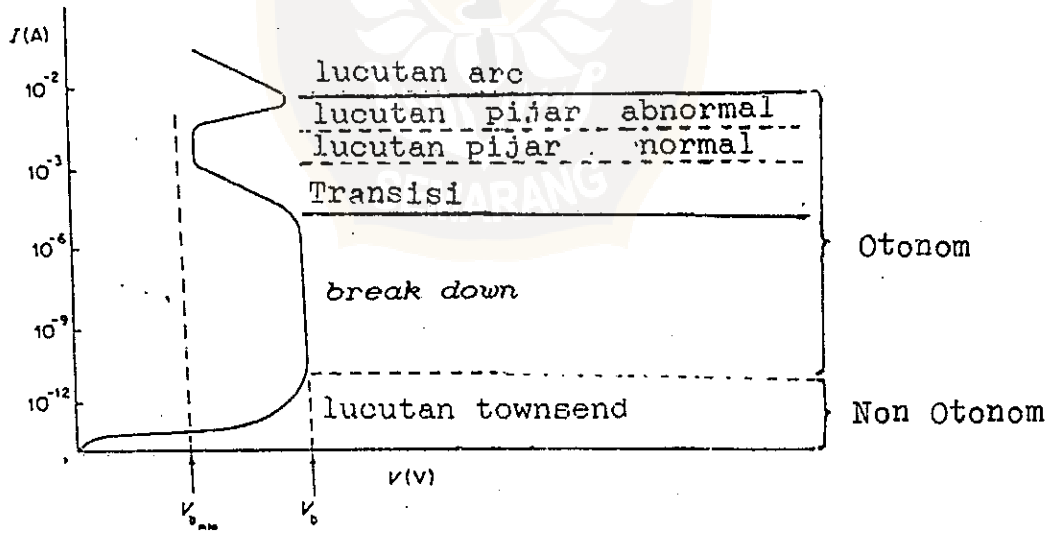
$$V_R = \mu_d \; [\, 1 - \exp\{\, \beta(R-R_o) \,\} \,]^2 \qquad (2\text{-}4)$$

Untuk $R = R_o$, V_R akan minimum ($V_R = 0$); untuk $R \longrightarrow \infty$ energi potensial $V_R \longrightarrow \mu_d$, dimana μ_d adalah energi dissosiasi molekul, yaitu energi yang diperlukan untuk

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

memisahkan dua atom hingga berjarak tak berhingga, β adalah suatu konstanta khusus untuk tingkat energi elektronik tertentu dari suatu molekul, R adalah jarak antar inti atom, dan R_o adalah jarak minimum antar inti atom.

Untuk menggambarkan proses terbentuknya plasma, sebagai contoh kita tinjau kelakuan tabung lucutan gas pada tekanan rendah. Pertama akan ditinjau hubungan antara beda tegangan dengan arus, kemudian keadaan fisis yang timbul dalam tabung tersebut sebagai akibat tidak meratanya distribusi tegangan dalam tabung. Perhatikan gambar 2-3.



Gambar 2-3. Hubungan antara tegangan dan arus dalam tabung. (Ahmed, 1987)

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

Pada saat tegangan penyedia daya dinaikkan, akan terjadi kenaikan tegangan dan arus. Pada saat tegangan mencapai nilai tertentu, V_b (tegangan *break down*), di dalam tabung mulai terjadi ionisasi berantai. Hal ini menyebabkan arus bertambah dengan cepat tanpa perubahan tegangan,

Jika arus terus bertambah, mulailah tampak nyala terang dalam tabung disertai terjadinya penurunan tegangan pada elektroda. Keadaan ini disebut lucutan pijar subnormal *(subnormal glow discharge)*. Penambahan arus selanjutnya tidak mengubah tegangan elektroda. Dalam keadaan ini nyala menjadi lebih terang. Keadaan ini dinamakan lucutan pijar normal *(normal glow discharge)*. Jika arus bertambah terus, maka tegangan akan naik lagi, kemudian akan turun kembali dan selanjutnya tegangan akan tetap walaupun arus bertambah. Keadaan ini dinamakan lucutan pijar abnormal *(abnormal glow discharge)*, dan selanjtnya dinamakan *arc discharge*.

Dari uraian di atas, berdasarkan hubungan antara tegangan pada elektroda dan arus, dapat diketahui tipe-tipe lucutan gas yaitu:

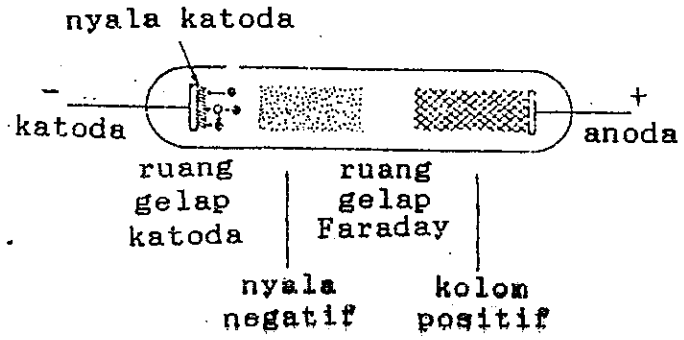
- lucutan townsend *(townsend discharge)*
- lucutan pijar *(glow discharge)*
- lucutan arc *(arc discharge)*

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

Dari ketiga tipe lucutan tersebut, tipe lucutan pijar merupakan bagian terpenting karena di dalamnya terdapat jumlah muatan positif dan negatif hampir sama. Daerah ini diperlukan untuk mendapatkan plasma beserta parameter-parameter di dalamnya.

Lucutan pijar didefinisikan sebagai lucutan bermuatan listrik dalam gas bertekanan rendah yang disertai dengan adanya nyala pijar serta memiliki sifat-sifat yang khas yaitu potensial ruang disekitar katoda (daerah nyala negatif) menjadi lebih tinggi dari potensial ionisasi gasnya, sehingga pada daerah ini intensitas cahayanya menjadi lebih besar.

Gejala-gejala fisis yang tampak pada tabung lucutan di daerah lucutan pijar sepanjang anoda-katoda adalah seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2-4. Lucutan pijar beserta gejala fisis yang tampak (Ahmed, 1987)

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

Pada tabung lucutan gas pada daerah lucutan pijar akan tampak gejala-gejala fisis sebagai berikut:

1. ruang gelap Aston
2. lapisan katoda
3. ruang gelap katoda
4. nyala negatif
5. ruang gelap Faraday
6. kolom positif
7. ruang gelap anoda
8. nyala anoda

Panjang batas masing-masing daerah tergantung dari tekanan tabung lucutan, beda tegangan yang terpasang dan jarak antar elektrodanya. (Purwadi , 1988)

Bagian yang paling penting dari lucutan pijar ini adalah kolom positif dimana pada daerah ini elektron-elektron akan bercampur dengan ion-ion positif dengan kerapatan yang hampir sama, sehingga muatan total di daerah ini hampir netral. Campuran elektron dan ion inilah yang dinamakan plasma. Daerah nyala positif dan negatif pada tabung tersebut mempunyai warna yang khas tergantung jenis gas yang diisikan. Untuk gas nitrogen daerah nyala positif berwarna biru dan daerah nyala negatif berwarna merah.

Dalam reaktor plasma yang menggunakan teknik radio frekuensi terbentuknya plasma dipengaruhi oleh parameter-parameter dari sistem reaktor, seperti:

- daya rf
- tekanan
- jarak antar elektroda
- beda tegangan antara anoda dan katoda.

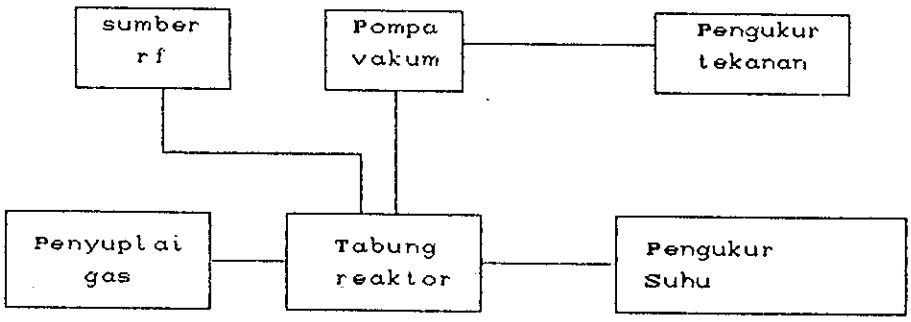
This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

Parameter plasma merupakan besaran yang memberikan gambaran kondisi plasma. Parameter-parameter penting untuk tujuan pembuatan lapisan tipis misalnya, adalah suhu, T_e dan kerapatan n_e. Kedua parameter tersebut mengacu pada partikel elektron. Hal ini karena elektron merupakan partikel yang paling banyak mendapat tambahan energi dari medan RF karena massanya yang kecil. Dengan demikian pemanasan plasma diawali dari pada pemanasan elektron bila sumber tenaganya dari medan elektromagnetik.

Kerapatan plasma penting artinya untuk meningkatkan laju deposisi, karena jika rapat elektron naik maka rapat radikal (misalnya senyawa nitrogen dengan atom substrat) akan meningkat. (Reinberg, 1979)

Sistem reaktor plasma radio frekuensi lucutan pijar mempunyai bagian- bagian sebagai berikut :

1. Tabung reaktor
2. Pompa vakum
3. Penyedia daya rf
4. Penyedia daya probe
5. Penyuplai gas



Gambar 2-5. Blok diagram sistem reaktor plasma rf lucutan pijar

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

2.2. Nitridasi Plasma RF Lucutan Pijar

Pada uraian di atas telah dijelaskan tentang proses terbentuknya plasma. Berikut ini akan dijelaskan tentang pemanfaatan teknik plasma lucutan pijar untuk proses nitridasi pada suatu bahan logam.

2.2.1. Definisi Nitridasi

Nitridasi adalah suatu proses pendeposisian ion nitrogen pada cuplikan logam yang terjadi dalam suatu tabung dalam lingkungan pada tekanan rendah yang dipanaskan pada daerah suhu tertentu sehingga terbentuk lapisan nitrid pada permukaan cuplikan tersebut. Terbentuknya lapisan tipis nitrid ini menyebabkan berubahnya sifat-sifat mekanik bahan (misalnya sifat kekerasannya) menjadi lebih unggul karena struktur kristalnya berubah akibat proses pemanasan. (Beumer,1985; Surdia,1992; Begeman,1956)

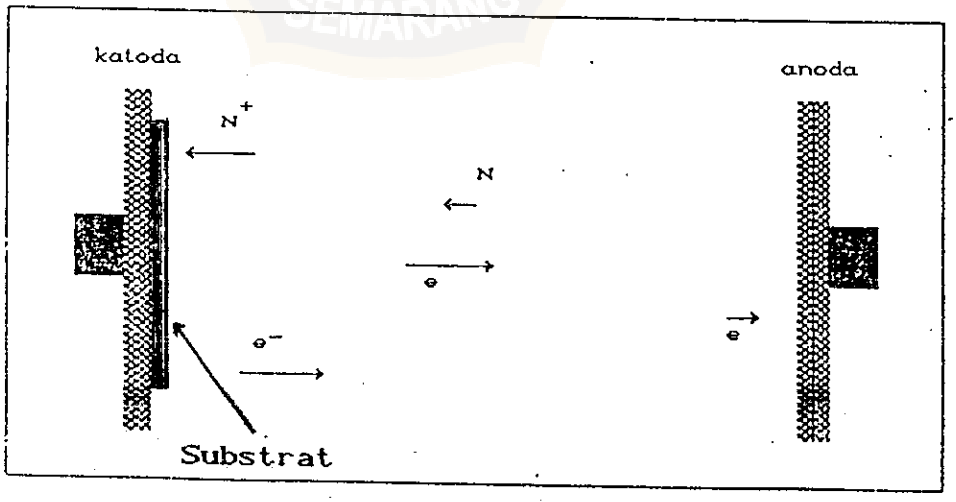
2.2.2. Nitridasi Dengan Teknik Plasma Lucutan Pijar

Dalam reaktor plasma lucutan pijar, elektron-elektron bebas bergerak menuju anoda. Dalam perjalanannya menuju anoda elektron-elektron bebas akan bertumbukan dengan partikel-partikel gas yang menyebabkan terjadinya ionisasi yang menghasilkan ion-ion positif (N^+ dan N_2^+) dan elektron.

Ion-ion nitrogen yang terbentuk selanjutnya karena adanya medan listrik, akan dipercepat menuju katoda. (Dalam hal ini material yang akan dinitridasi diletakkan pada

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

katoda). Karena plasma termasuk jenis radiasi pengion, maka interaksi antara atom ion-ion plasma yang berenergi tinggi dengan atom-atom sasaran akan menyebabkan berbagai macam cacat yang mempengaruhi sifat bahan. Antara lain bentuk cacat tersebut adalah kehampaan (vacancy) yaitu cacat yang disebabkan oleh bergesernya atau terpentalnya atom-atom sasaran dari posisi awalnya. Sementara itu atom yang bergeser tadi akan menempati ruang kosong disekitarnya secara sisipan (intertition). Dengan demikian selama proses nitridasi akan terbentuk pasangan kosong dan sisipan. Lamanya waktu proses nitridasi ini akan mempengaruhi kedalaman ion-ion nitrogen masuk ke dalam material secara difusi. (Konuma, 1991)



Gambar 2-6. Mekanisme lucutan ion-elektron dan posisi substrat

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

2.2.3. Proses Pembentukan Lapisan Tipis Pada Cuplikan

Adanya partikel-partikel gas hasil reaksi selanjutnya disebut plasma spesies mempunyai muatan positif (berupa N^+ dan N_2^+). Plasma spesies yang bermuatan positif tersebut akan menimbulkan reaksi-reaksi sebagai berikut:

- kenaikan suhu pada cuplikan
- okulasi partikel-partikel plasma spesies
- pelepasan atau evaporasi atom-atom permukaan cuplikan
- serta deposisi molekul-molekul hasil rekombinasi

Plasma spesies bermuatan positif yang menumbuk permukaan katoda juga dapat menghasilkan pancaran (emisi) elektron sekunder yang menyebabkan terus berlanjutnya peristiwa tumbukan yang mungkin terjadi dengan partikel-partikel gas selama proses pembentukan lapisan. Oleh karena itu pancaran elektron sekunder ini turut menentukan jumlah plasma spesies yang akan dihasilkan. Banyaknya jumlah plasma spesies yang dihasilkan sangat mempengaruhi kualitas akhir sifat lapisan yang dibentuk.

Peristiwa tumbukan plasma spesies yang bermuatan positif ke permukaan katoda menyebabkan atom-atom yang terdapat dalam permukaan katoda (cuplikan logam) terlepas sehingga terbentuklah kekosongan. atom cuplikan yang terlepas tersebut kemudian akan berekombinasi dengan atom-atom gas nitrogen hasil peristiwa dissosiasi membentuk ikatan molekul nitrid. Molekul nitrid ini selanjutnya akan terdeposisi ke permukaan cuplikan membentuk lapisan senyawa

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

nitrid. Karena adanya energi absorbsi, maka sebagian molekul nitrid ini terdifusi masuk ke dalam cuplikan logam mengisi kekosongan yang ada. Banyaknya molekul nitrid yang terdifusi tergantung pada besar suhu dan lamanya waktu pendeposisian. Cuplikan bersuhu tinggi akan menyebabkan atom-atom internalnya bergetar dan menimbulkan jarak antar atom yang lebih besar. Jarak antar atom yang lebih besar akan memungkinkan atom-atom yang memiliki energi tinggi atau berada di atas energi ikatannya bergerak mendobrak ikatannya dan melompat ke posisi yang baru. Proses pergerakan atom semacam inilah yang disebut difusi.

Energi yang diperlukan untuk sebuah atom pindah tempat disebut energi aktivasi. Besar energi aktivasi dapat ditentukan dengan persamaan berikut: (Vlack, 1991)

$$\frac{n}{N} = M \exp(-E/kT) \qquad (2\text{-}5)$$

dimana: n = jumlah atom yang berenergi E

N = jumlah atom total

M = konstanta perbandingan

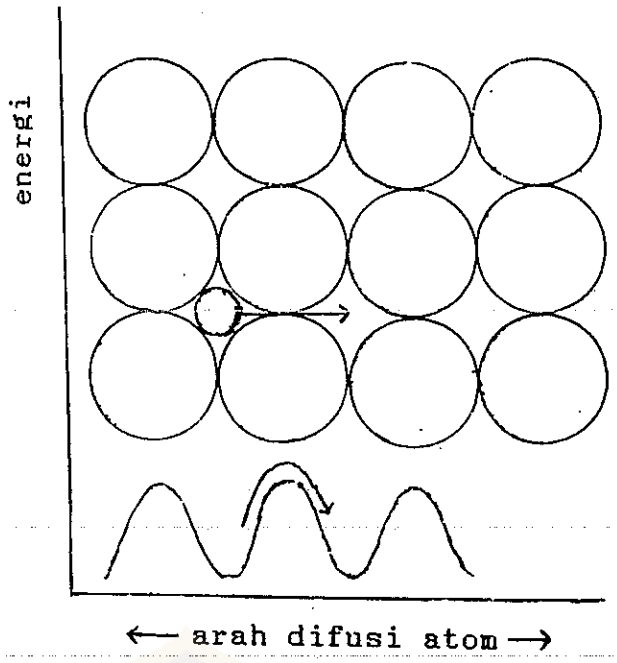
E = energi aktivasi atom (J)

k = konstanta Boltzman ($13{,}8 \times 10^{-24}$ J/ K)

T = suhu (K)

Untuk menerangkan lebih jelas tentang mekanisme difusi, perhatikan Gambar 2-7.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)



Gambar 2.7. Pergerakan atom dalam mekanisme difusi (Vlack, 1991)

Hubungan antara energi aktivasi (E) dengan tingkat difusifitas (D), menurut Boltzman adalah sebagai berikut: (Vlack, 1991)

$$D = D_o \exp(-E/kT) \qquad (2\text{-}6)$$

atau

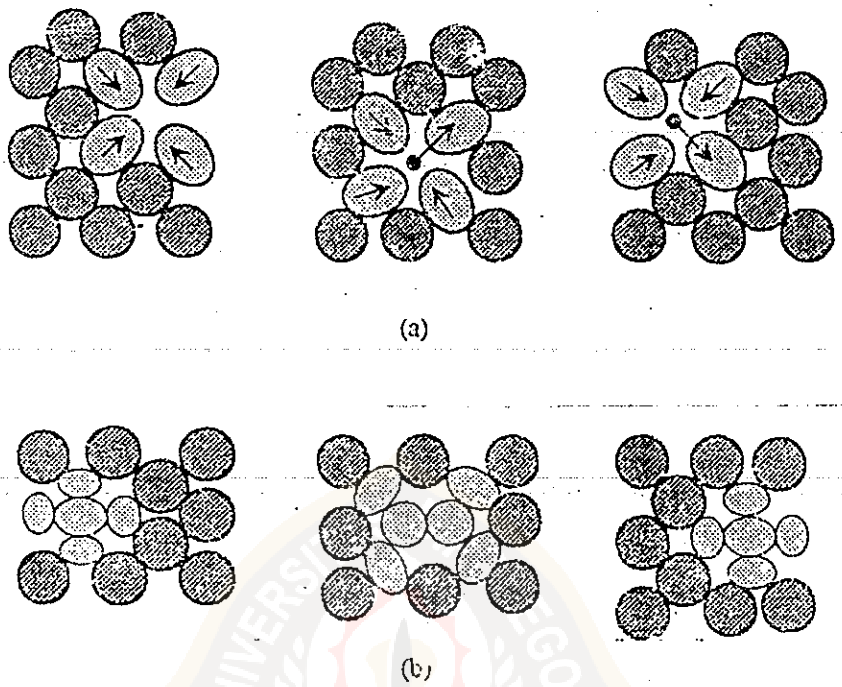
$$\ln D = \ln D_o - E/kT \qquad (2\text{-}7)$$

dimana D_o adalah konstanta difusi yang nilainya tidak tergantung suhu.

Tingkat difusifitas didefinisikan sebagai besarnya luasan yang ditempati atom-atom yang berhasil pindah tempat dengan energi sebesar energi aktifasi dalam setiap detiknya. Persamaan (2-7) menunjukkan hubungan antara difusifitas dengan suhu.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

Ada dua macam mekanisme difusi, yaitu difusi dengan kekosongan dan difusi dengan interstisi.



Gambar 2.8. Mekanisme difusi (a) dengan kekosongan, (b) dengan interstisi.

Difusi dengan Kekosongan

Mekanisme kekosongan akan lebih menonjol bila semua atom memiliki ukuran yang hampir sama. Kekosongan terjadi akibat struktur yang cacat akibat agitasi (gejolak) suhu. Kekosongan bergerak dalam arah yang bertentangan dengan arah difusi atom.

Difusi dengan Interstisi

Interstisi terjadi jika atom yang digeser berhenti pada posisi antar atom-atom kristal. (Ilyas, 1978). pada saat

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

suhu naik, atom-atom yang lebih kecil akan bergerak ke posisi intertisi berikutnya. Contohnya atom karbon yang sangat kecil (r = 0.07 nm) menempati posisi intertisi diantara atom-atom besi. Bila suhu naik dan energi aktivasi meningkat, maka atom karbon berenergi cukup dapat bergerak diantara atom besi menuju posisi intertisi berikutnya.

2.3. Baja Karbon

Baja didefinisikan sebagai paduan antara besi (Fe) sebagai logam pokoknya dan Karbon (C) sebagai unsur tambahannya. (Harsono, 1978)

Oleh karena itu umumnya sebagian besar baja komersial hanya mengandung karbon dengan sedikit unsur paduan lain. Untuk perpaduan besi dan karbon yang kadar karbonnya kurang dari 1,7% disebut baja karbon.

Atom karbon dalam baja adalah atom-atom yang kecil, yang larut dalam besi dalam bentuk interstisi. Kekerasan baja karbon akan meningkat dengan meningkatnya kadar karbon. (Vlack, 1989)

Klasifikasi baja menurut tingkatnya ditentukan oleh komposisi karbon dalam baja, yaitu:

a) Baja karbon rendah (komposisi C kurang dari 0,3%)

b) Baja karbon medium (komposisi C antara 0,3% - 0.7%)

c) Baja karbon tinggi (komposisi C antara 0,7% - 1,7%)

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

2.4. Tinjauan Tentang Sifat Logam

Pemanfaatan suatu material sangat ditentukan oleh sifat-sifatnya. Untuk hal-hal tertentu diperlukan kombinasi beberapa sifat.

Sifat mekanis logam yang mendukung penelitian ini adalah sifat deformasi plastis yang berhubungan dengan kekerasan bahan. Sedangkan sifat kimia yang mendukung penelitian ini adalah sifat difusivitas. Atom-atom dengan jari-jari yang kecil mampu berdifusi ke dalam kristal logam yang mempunyai konstanta kisi yang lebih besar.

Mekanisme difusi yang digunakan untuk penguatan logam, misalnya penguatan logam dengan cara nitridasi atau karburasi, yaitu dengan mendifusikan atom-atom nitrogen atau karbon ke dalam baja sehingga meningkatkan kekerasan dan kekuatan baja.

Deformasi plastis adalah perubahan bentuk permanen pada suatu bahan akibat ditarik melewati batas elastisitasnya.

Bahan yang dideformasi plastis akan semakin keras. Mekanisme ini disebut pengerasan regang (strain hardening) atau pengerasan kerja (work hardening).

2.4.1. Struktur Mikro Logam

Secara mikrostruktur, logam tersusun dari butir-butir logam yang memiliki orientasi tertentu. Antara butir yang satu dengan butir yang lain dibatasi oleh batas butir (*grain boundari*). Butir (*grain*) adalah sekumpulan partikel-

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

partikel logam yang memiliki orientasi kristal yang sama. Makin banyak partikel-partikel yang terkumpul pada suatu lokasi dengan arah orientasi kristal yang sama, maka akan makin besarlah butir tersebut.

Batas butir merupakan bidang yang membatasi antara partikel-partikel logam yang berbeda oerientasinya.

Besar butir ditunjukkan oleh diameter butir. Butir yang memiliki diameter sampai 10 mikron disebut butir halus. Butir yang memiliki diameter sampai 50 mikron disebut butir sedang, dan butir yang memiliki diameter lebih dari 50 mikron disebut butir kasar.

Besar butir logam sangat menentukan sifat mekanisnya. Semakin halus butir maka kekuatan luluh bahan akan semakin tinggi. Hal ini dapat digambarkan dalam suatu diagram fasa. Diagram fasa ini sangat penting terutama untuk proses perlakuan panas dalam rangka meningkatkan sifat mekanis logam.

Untuk meningkatkan sifat mekanis baja, dilakukan berbagai perlakuan penguatan diantaranya selain dengan perlakuan panas adalah deformasi plastis.

Pengamatan atas struktur logam, atau dikenal dengan metalografi dapat menggunakan mikroskop optik berresolusi tinggi, mikroskop elektron tansmisi (Transmission Electron Microscope) atau mikroskop elektron skaning (Scanning Electron Microscope). Dari pengamatan menggunakan mikroskop tersebut akan diperoleh gambar struktur mikro yang memberikan fasa-fasa yang terdapat dalam bahan.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

2.4.2. Uji Kekerasan Mikro

Kekerasan adalah ketahanan bahan terhadap indentasi atau deformasi plastis. pengukurannya dapat dilakukan secara mikro maupun secara makro. Pengujian kekerasan mikro dibutuhkan untuk mengukur kekerasan lapisan tipis.

Tujuan pengujian kekerasan adalah untuk mengetahui ketahanan bahan terhadap beban yang merupakan ukuran ketahanan bahan terhadap deformasi plastis.

Prinsip Pengujian Kekerasan Dengan Metoda Indentasi

Pada benda uji yang permukaannya rata dilakukan penekanan dengan menggunakan indentor. Beban yang digunakan untuk tiap jenis logam adalah berbeda, tergantung metode pengukuran yang digunakan.

Besarnya deformasi plastis akibat penekanan tersebut kemudian dilihat pada mikroskop pengukur. Untuk metode Brinnel yang diukur adalah diameter jejaknya, sedangkan Vickers dan Knoop panjang diagonal rata-rata dari jejak. Pada Rockwell nilai kekerasan dapat dibaca langsung dari skala yang ada pada mesin tersebut.

Hasil pengukuran yang diperoleh kemudian dimasukkan pada rumus yang sesuai dengan rumus masing-masing metoda untuk menentukan kekerasan dari logam yang diuji.

Uji Kekerasan Knoop

Pengujian kekerasan menggunakan alat uji Knoop akan menghasilkan angka kekerasan mikro yang kita inginkan.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

Penumbuk Knoop yang khusus memberikan kemungkinan membuat lekukan yang lebih rapat dibandingkan dengan lekukan Vickers. Keuntungan lain dari metoda Knoop ini adalah untuk diagonal yang panjang, luas kedalamam kekuatan Knoop kira-kira 15% dari luas lekukan Vickers untuk panjang diagonal yang sama. Hal ini sangat berguna khususnya apabila mengukur kekerasan lapisan tipis. (Dieter, 1993)

Penumbuk Knoop adalah intan kasar yang dibentuk menjadi piramida sedemikian rupa sehingga menghasilkan lekukan bentuk intan dengan perbandingan diagonal panjang dan diagonal pendek adalah 7:1. Angka kekerasan Knoop mengikuti persamaan di bawah ini :

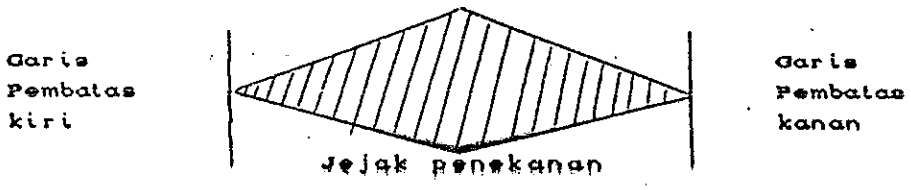
$$KHN = \frac{P}{A_P} = \frac{P}{L^2 C} = 14,23 \frac{P}{L^2} \qquad (2\text{-}8)$$

dimana P = beban yang diterapkan (g)

A_P = luas proyeksi lekukan yang tidak pulih ke bentuk semula (μm^2)

L = panjang diagonal (μm)

C = konstanta untuk sistem penumbuk.



Gambar 2-9. Bekas lekukan dengan Knoop

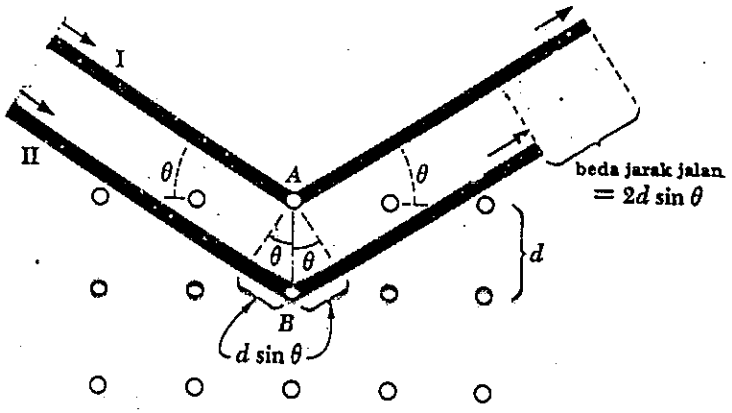
This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

Untuk mengetahui perubahan kekerasan bahan akibat nitridasi dilakukan pembandingan antara bahan yang dinitridasi dengan bahan yang tidak dinitridasi.

2.5. Difraksi Sinar-X

Untuk menentukan sistem kristal dan geometri satu satuan sel (unit cell) metoda yang biasa digunakan adalah difraksi sinar-X, mengingat bahwa teknik ini cukup sederhana dan tidak membutuhkan cuplikan dengan ukuran yang besar. Dengan metoda difraksi sinar-X ini maka efek dari kisi yang mempunyai titik-titik pusat dapat terdeteksi dengan memeriksa pola distribusi intensitas secara sistematis akan ada atau tidaknya refleksi yang terjadi.

Gambar 2.10 menunjukkan suatu berkas sinar-X dengan panjang gelombang λ, jatuh dengan sudut θ pada sekumpulan bidang kristal berjarak d.



Gambar 2.10. Difraksi sinar-X

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

Syarat yang harus dicapai agar difraksi sinar-X dapat terjadi adalah dipenuhinya hukum Bragg, yaitu:

$$n\lambda = 2.d_{hkl}.\sin\theta_{hkl} \qquad (2\text{-}9)$$

dimana, d_{hkl} adalah jarak antara dua bidang kisi kristal hkl (hkl adalah indeks Miller), dan θ_{hkl} adalah sudut difraksi antara sinar datang dan sinar pantul.

Arah berkas sinar yang dipantulkan ditentukan sepenuhnya oleh geometri kisi, dan geometri kisi diatur oleh orientasi dan jarak antara bidang-bidang kristal. Untuk kristal kubus diberikan ukuran struktur sel a (parameter kisi), yang dapat dihitung dengan rumus:

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \qquad (2\text{-}10)$$

Dari persamaan Bragg (2-9) dan (2-10) diperoleh:

$$\lambda = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \times 2 \sin\theta_{hkl} \qquad (2\text{-}11)$$

Dari data difraksi sinar-X didapatkan hasil eksperimen $2\theta_{hkl}$ dan d_{hkl}. Interpretasi difraksi sinar-X untuk logam dengan bentuk struktur kubus berlaku persamaan:

$$\sin^2\theta = \frac{\lambda^2 (h^2 + k^2 + l^2)}{4\, a^2} \qquad (2\text{-}12)$$

Bidang refleksi (hkl) diperoleh dengan cara membandingkan dua sudut refleksi pada dua bidang refleksi seperti tampak

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

pada persamaan (2-13)

$$\frac{\sin^2\theta_A}{\sin^2\theta_B} = \frac{h_A^2 + k_A^2 + l_A^2}{h_B^2 + k_B^2 + l_B^2} \qquad (2\text{-}13)$$

dimana θ_A dan θ_B masing-masing adalah sudut difraksi bidang $(h_A k_A l_A)$ dan $(h_B k_B l_B)$. Dari persamaan ini dapat diketahui hkl semuanya ganjil atau semuanya genap, atau campuran ganjil genap. Dengan demikian bentuk kisi dapat diketahui. Sedangkan untuk menghitung parameter kisi a, b , c dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (2-11). Untuk kubik, menggunakan persamaan:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \qquad (2\text{-}14)$$

Untuk kubik tetragonal, menggunakan persamaan:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \qquad (2\text{-}15)$$

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)