BAB II

DASAR TEORI

2.1. Susunan Atom dalam Bahan Padat

Ciri utama dari padatan kristal adalah atom-atom penyusunnya mengatur diri secara teratur dan berulang dalam pola 3 dimensi. Struktur atom ini disebut kristal.

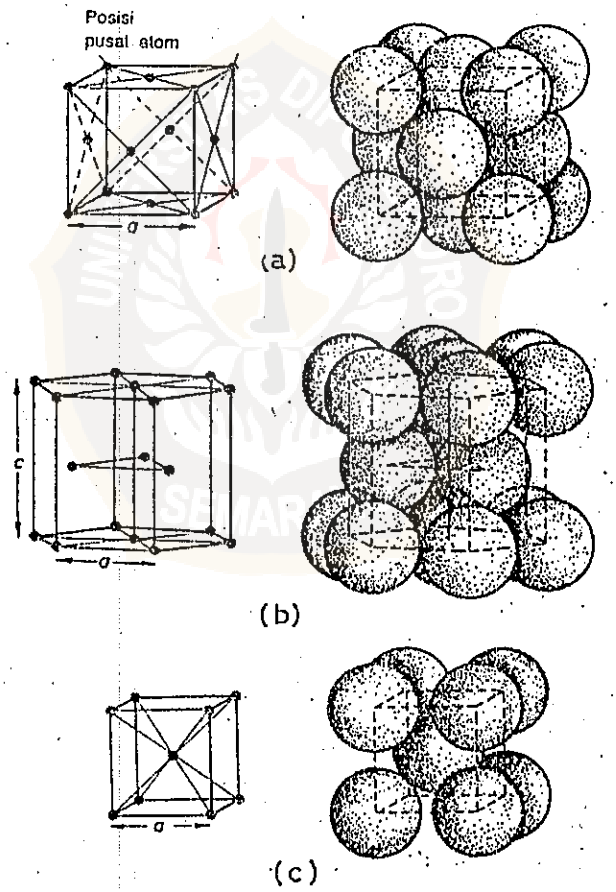
2.1.1. Kristal

Atom-atom dalam padatan membentuk susunan yang sedemikian rupa dengan volume sekecil mungkin. Untuk penataan atom-atom yang memungkinkan volume minimum dikenal 2 cara penataan, yaitu penataan kubus pusat sisi atau *face centred cubic* (f.c.c.), dan penataan heksagonal susunan rapat atau *closed-packed hexagonal* (c.p.h.). Struktur kubus pemusatan sisi ditunjukkan pada gambar 2.1.(a). Selain atom pada setiap titik sudut sel satuan, terdapat sebuah atom di setiap bidang permukaan. Struktur heksagonal penataan rapat mempunyai ciri bahwa setiap atom dalam lapisan tertentu terletak tepat di atas atau di bawah sela antara tiga atom pada lapisan berikutnya, akibatnya setiap atom menyinggung tiga atom lainnya pada lapisan di bawahnya. Penataan heksagonal pemusatan rapat ditunjukkan pada gambar 2.1.(b). Penataan kubus pusat ruang atau *body centred cubic* (b.c.c.) dianut oleh banyak logam meskipun tidak rapat. Penataan kubus pusat ruang ditunjukkan pada gambar 2.1.(c). Disamping ketiga struktur kristal yang telah disebutkan, struktur-struktur lain seperti *tetragonal* dan *rhombohedral* juga ada.

Sebuah konsep penting sehubungan dengan struktur kristal ini adalah **"bilangan koordinasi"** yang didefinisikan sebagai banyaknya atom berjarak

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)

terdekat yang sama dari sebuah atom manapun dalam struktur kristal. Dalam struktur kubus pusat ruang seperti pada gambar 2.1.(c), dapat dilihat bahwa atom di pusat kubus dikelilingi oleh delapan buah atom yang berjarak sama yang terletak di sudut-sudut kubus, maka struktur kubus pusat ruang mempunyai bilangan koordinasi 8. Pada struktur kubus pusat sisi, sebuah atom dikelilingi oleh 12 atom-atom yang lain. Dengan demikian struktur kubus pusat sisi mempunyai bilangan koordinasi 12. Struktur heksagonal susunan rapat juga mempunyai bilangan koordinasi 12, hal ini mudah terlihat bahwa dua sel ditumpuk dan memilih atom di pusat bidang bersama sebagai titik acuan.



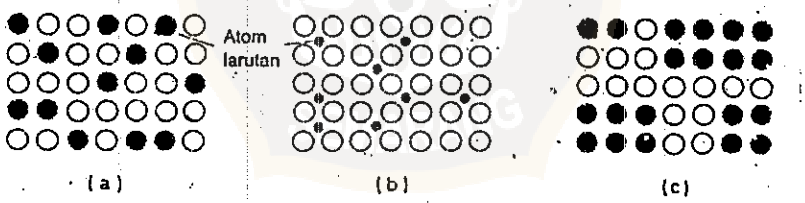
Gambar 2.1. Struktur atom pada kristal (a) struktur kubik pusat sisi, (b) struktur *closed-packed hexagonal* (c) struktur *body-centred cubic* (Smallman, 1991)

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 Ketaksempurnaan dalam kristal

Sebelumnya telah dibahas bahwa atom-atom dalam logam padat tidak tersusun secara acak, namun tersusun dengan pola teratur yang dikenal dengan susunan kristal. Struktur dasar kistal logam sejati memang beraturan seperti yang telah diuraikan, namun distorsi kisi serta ketidaksempurnaan tertentu selalu ada.

Salah satu penyebab ketidaksempurnaan itu karena atom-atom tidak pernah diam melainkan bergetar di sekitar kedudukan purata dalam kisi, dengan frekuensi yang ditentukan oleh gaya antar-atom dan dengan amplitudo yang bergantung pada temperatur kristal. Penyebab ketidaksempurnaan lainnya adalah kristal mungkin mengandung atom-atom asing, yang karena berbeda ukuran atomiknya menyebabkan distorsi-distrosi lokal pada kisi pelarut bersangkutan. Selain akibat adanya atom-atom asing, ketidakteraturan lain adalah yang umumnya digolongkan sebagai ketidaksempurnaan atau cacat kisi. Ketidak sempurnaan ini meliputi cacat titik, cacat garis, dan cacat volume (Smallman, 1991).

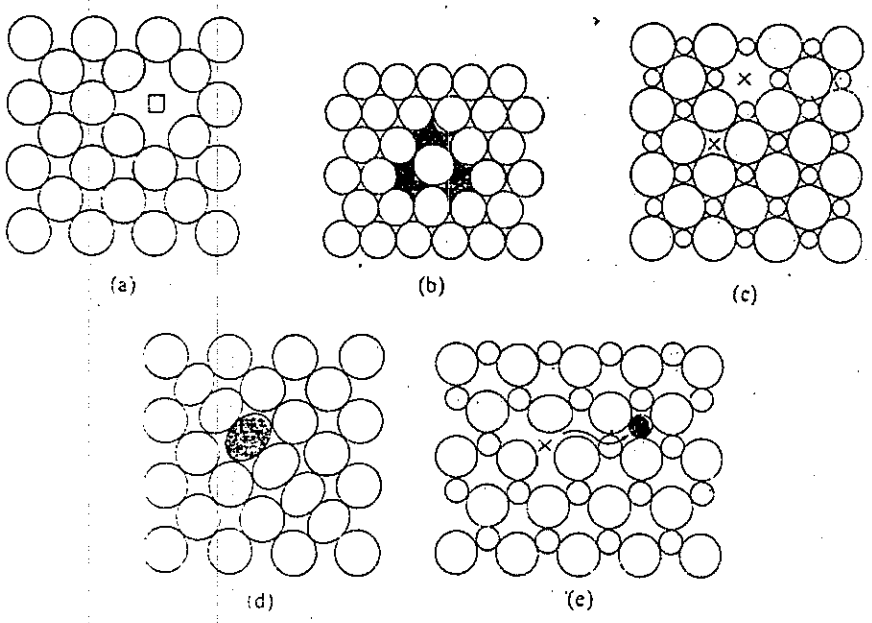


Gambar 2.2. Ketidaksempurnaan kristal (a) larutan padat substitusional, (b) larutan padat interstisial, (c) campuran fase (Smallman, 1991)

Cacat titik.

Cacat titik terjadi bila penyimpangan susunan periodik kisi terbatas sampai disekitar beberapa atom.

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 2.3. Cacat titik pada kristal (a) kekosongan, (b) kekosongan ganda, (c) kekosongan pasangan ion, (d) sisipan, (e) ion terpisah (Vlack, 1992)

Cacat titik yang mungkin dapat terjadi adalah :

(a) Kekosongan (*vacancy*)

Kekosongan terjadi bila ada atom yang "hilang" dalam kristal, ini disebabkan karena penumpukkan yang salah sewaktu kristalisasi atau dapat juga terjadi pada suhu yang tinggi, oleh karena energi thermal meningkat maka kemungkinan atom-atom untuk melompat meninggalkan tempatnya akan naik pula. Kekosongan yang mungkin terjadi, yaitu kekosongan tunggal, kekosongan ganda dan kekosongan rangkap tiga.

(b) Kekosongan pasangan ion.

Terdapat dalam senyawa yang harus mempunyai keseimbangan muatan. Cacat ini mencakup kekosongan pasangan ion dan muatan berlawanan.

(c) Sisipan.

Terjadi jika suatu atom tambahan dapat berada dalam struktur kristal, khususnya bila faktor tumpukan atom rendah.

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)

(d) Perpindahan.

Cacat ini terjadi jika ada perpindahan ion dari kisi ke tempat sisipan.

Cacat garis.

Cacat dua dimensional atau cacat garis yang paling penting ialah dislokasi. Dislokasi adalah sejenis cacat dalam struktur kristal yang bersifat planar dengan penambahan setengah bidang sisipan atau dengan kehilangan bidang tertentu dalam struktur kristal. Tiga sifat sederhana dari dislokasi adalah :

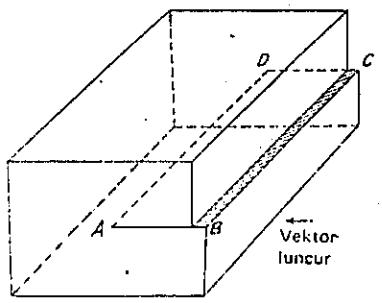
- dislokasi merupakan diskontinyuitas garis,
- dislokasi membentuk garis tertutup di dalam kristal atau memotong permukaan logam,
- selisih jumlah slip sepanjang garis dislokasi adalah konstan.

Dua macam dislokasi yang sering dijumpai dalam logam adalah dislokasi sisi dan dislokasi ulir.

(a) Dislokasi sisi.

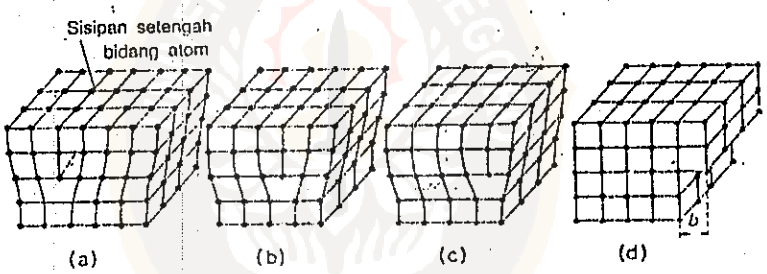
Jika garis yang terbentuk tegak lurus pada arah slip, maka yang terjadi adalah dislokasi sisi atau dislokasi Taylor-Orowan. Gambar 2.4. memperlihatkan slip yang menghasilkan dislokasi sisi untuk elemen kristal yang memiliki kisi kubik sederhana. Slip terjadi dalam arah vektor slip pada daerah ABCD. Perbatasan antara bagian slip kristal sebelah kanan dan bagian yang belum slip ialah garis AD, yaitu dislokasi sisi.

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 2.4. Dislokasi sisi yang dihasilkan oleh slip dalam kisi kubis sederhana (Dieter, 1993)

Suatu dislokasi sisi dengan bidang atom ekstra sebelah atas bidang slip, berdasarkan kesepakatan disebut dislokasi sisi positif dan seringkali ditandai dengan simbol ⊥. Kalau bidang atom ekstra itu terletak sebelah bawah bidang slip, dislokasinya merupakan dislokasi sisi negatif T.



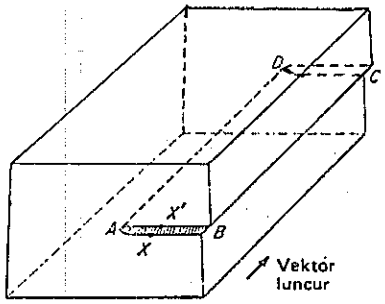
Gambar 2.5. Slip akibat pergerakan dislokasi sisi (Smallman, 1991)

(b) Dislokasi ulir.

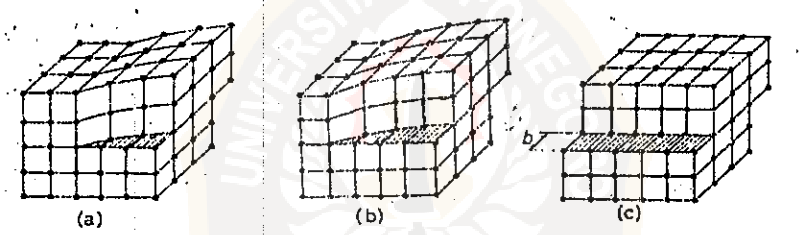
Bila garis dislokasi sejajar dengan arah slip, garis dislokasi tersebut disebut dislokasi ulir atau dislokasi Burgers. Gambar 2.6. memperlihatkan contoh sederhana dislokasi ulir. Bagian atas kristal sebelah kanan AD bergerak relatif terhadap bagian bawah dalam arah vektor slip. Disebelah kiri AD tidak terjadi slip dan karena itu AD merupakan garis dislokasi. Jadi dislokasi itu sejajar dengan vektor Burgers-nya,

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)

atau dengan vektor slip, dan menurut definisi dislokasi ini harus merupakan dislokasi ulir.



Gambar 2.6. Slip yang menghasilkan dislokasi ulir dalam kisi kubis sederhana (Dieter, 1993)



Gambar 2.7. Slip akibat pergerakan dislokasi ulir (Smallman, 1991)

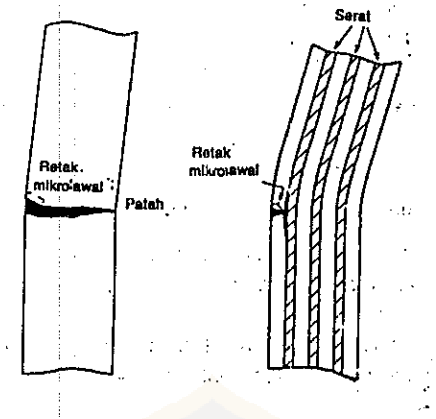
Cacat volume.

Cacat volume meliputi retakan dan rongga. Retak mikro merupakan diskontinuitas yang terletak di dalam bidang, dengan ukuran mulai beberapa puluh atom, hingga retak yang dapat dilihat di bawah mikroskop. Dalam semua benda padat dijumpai retak mikro. Tetapi pada logam pengaruh gaya luar diimbangi oleh pergerakan dislokasi dekat ujung retak. Biasanya dislokasi ini bergerak dan menghasilkan deformasi plastis, yang mengurangi regangan pada ujung retak sehingga retak tidak

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)

merambat. Akan tetapi jika dislokasi terhenti, retak merambat dan terjadilah patahan. Kejadian semacam ini disebut patah rapuh. Di sini tidak terdapat deformasi plastik dan ini terjadi sewaktu logam masih berperilaku elastik.

Sedangkan rongga terbentuk karena adanya atom gas dalam padatan tersebut.



Gambar 2.8. Retak mikro (Alexander, 1991)

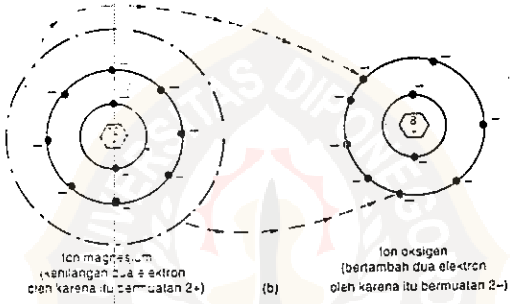
2.1.3. Jenis ikatan dalam bahan padat

Atom terdiri atas inti atom yang bermuatan positif yang dikelilingi oleh sejumlah elektron. Pada atom netral jumlah muatan elektron sama dengan muatan inti, sehingga secara keseluruhan atom tersebut netral. Elektron tersusun dalam beberapa tingkatan energi atau kulit energi. Elektron pada kulit energi terluar mempunyai ikatan yang paling lemah dengan intinya. Tidak semua atom memiliki kulit terluar yang terisi elektron secara penuh. Sedangkan untuk mencapai kestabilan, suatu atom harus memiliki kulit terluar yang terisi elektron secara penuh. Oleh karena itu antara atom yang satu dengan atom yang lain akan saling membentuk ikatan untuk memenuhi kekurangan elektron. Keadaan inilah yang mengakibatkan terbentuknya tiga jenis ikatan atom yaitu ikatan ionik, ikatan kovalen, dan ikatan logam.

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)

Ikatan ionik

Ikatan ionik atau ikatan heteropolar terjadi antara atom logam dengan atom bukan logam, dan mempunyai ciri temperatur lebur tinggi, keras, dan rapuh. Sebagai contoh, adalah senyawa oksida magnesium. Ikatan ionik terbentuk bila atom oksigen menangkap 2 elektron terluar atom magnesium. Sehingga atom oksigen bertambah dua muatan negatif, dan atom magnesium kehilangan dua elektron terluarnya. Kedua atom tersebut akan mempunyai muatan elektrostatik yang berlawanan yang menghasilkan ikatan ionik (Alexander, 1991).



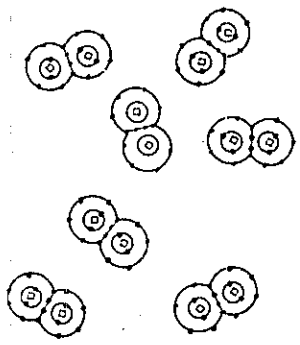
Gambar 2.9. Ikatan Ionik (Alexander, 1991)

Ikatan kovalen

Ikatan kovalen atau ikatan homopolar terjadi jika atom-atom yang bersebelahan secara bersama menggunakan elektron valensi mereka sedemikian rupa sehingga tiap atom seolah-olah memiliki kulit terluar penuh. Ikatan kovalen terjadi antara atom dengan empat elektron atau lebih pada kulit terluarnya, biasanya terjadi pada unsur non logam. Ciri penting lain pada ikatan kovalen adalah bahwa elektron-elektron yang dipakai bersama berada dalam keadaan-keadaan *s* dan *p*. Ikatan kovalen yang dibentuk oleh sebuah unsur sama dengan (8 – N) di mana N

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)

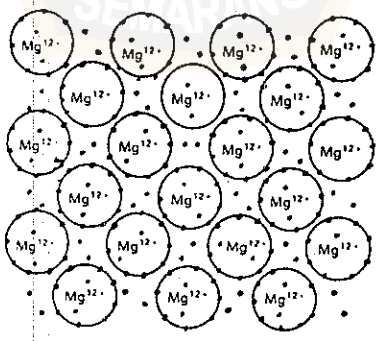
adalah banyaknya eletron di luar kulit terluar yang penuh. Sebagai contoh, adalah ikatan yang terjadi antara dua atom oksigen (Smallman, 1991).



Gambar 2.10. Ikatan Kovalen (Alexander, 1991)

Ikatan logam

Elektron pada kulit terluar suatu logam bergerak dengan bebas diseluruh bahan, sehingga dapat digambarkan bahwa logam adalah suatu susunan ion bermuatan positif dirembesi awan elektron. Susunan ion positif terikat menjadi satu oleh awan elektron bermuatan negatif membentuk ikatan khas yang disebut ikatan logam.



Gambar 2.11. Ikatan Logam (Alexander, 1991)

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)

Gaya ikat yang terjadi tidak mengikuti arah yang tertentu dan karena itu ion-ion akan mengelompok menurut bentuk geometri yang paling ekonomis. Perlu diingat juga bahwa gaya tolak menolak antar-ion akan membatasi derajat keekonomisan dan pengepakannya (Alexander, 1991).

2.2. Difusi

Bila suhu suatu material naik, energi akan meningkat dan menyebabkan atom-atom dari material tersebut bergetar dan menimbulkan jarak antar-atom yang lebih besar. Jarak antar-atom yang semakin besar akan memungkinkan bergerak mendobrak ikatannya dan melompat ke posisi yang baru. Proses pergerakan atom semacam ini disebut difusi. Energi yang diperlukan sebuah atom untuk berpindah tempat disebut energi aktivasi.

Jumlah atom yang terdifusi dalam satuan waktu melalui satu satuan luas penampang sepanjang satu satuan gradien konsentrasi disebut difusivitas atau koefisien difusi, D. Difusivitas dapat dinyatakan (Smallman, 1991) :

$$D = D_o \exp [- (E_f + E_m) / kT] \qquad (2.1)$$

dengan D_o adalah konstanta difusi yang nilainya tidak tergantung suhu (m^2/detik), E_f adalah energi pembentukan kekosongan (eV), k adalah konstanta Boltzmann ($1{,}381 \times 10^{-23}$ J/K), E_m adalah energi migrasi (eV), dan T adalah suhu (°K).

Tabel 2.1. Nilai E_f, dan E_m dalam elektron-volt untuk beberapa jenis logam (Smallman, 1991)

Energi	Cu	Ag	Au	Al	Ni	Pt	Mg	Fe	W	NiAl
Ef	1,0 - 1,1	1,1	0,98	0,76	1,4	1,.4	0,9	2,13	3,3	1,05
Em	1,0 - 1,1	0,83	0,83	0,62	1,5	1,1	0,5	0,76	1,9	2,4

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)

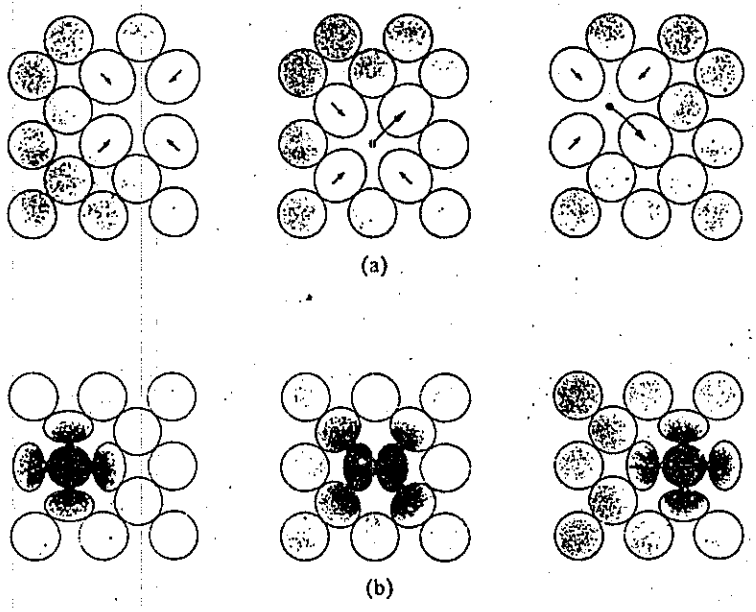
Tabel 2.2. Konstanta difusi untuk beberapa jenis logam (Vlack, 1992)

No	Yang larut	Pelarut (Struktur induk)	D0 m^2/detik
1	Karbon	besi kps	0,2 x 10-4
2	Karbon	besi kps	2,2 x 10-4
3	Besi	besi kps	0,22 x 10-4
4	Besi	besi kps	2,0 x 10-4
5	Nikel	besi kps	0,77 x 10-4
6	Mangan	besi kps	0,35 x 10-4
7	Seng	tembaga	0,34 x 10-4
8	Tembaga	alumunium	0,15 x 10-4
9	Tembaga	tembaga	0,2 x 10-4
10	Perak	perak (kristal)	0,4 x 10-4
11	Perak	perak (batas butir)	0,14 x 10-4
12	Karbon	titanium htp	5,1 x 10-4

Mekanisme perpindahan atom dalam suatu logam dapat terjadi secara *interstisi* dan kekosongan. Perpindahan secara *interstisi* terjadi bila atom tidak memiliki ukuran yang sama. Atom nitrogen sangat kecil sehingga dapat menempati letak *interstisi* di antara atom besi. Bila energinya cukup, atom nitrogen dapat bergerak di antara atom besi menuju letak interstisi berikutnya. Perpindahan secara kekosongan terjadi bila semua atom memiliki ukuran yang sama. Kekosongan terjadi sebagai akibat struktur yang cacat. Kekosongan tersebut akan diisi oleh atom yang terletak di sebelah kekosongan itu, sehingga dapat dikatakan atom melakukan gerak acak di dalam kristal.

Faktor-faktor yang mempercepat difusi : (1) suhu tinggi, (2) ukuran atom yang berdifusi kecil, (3) ikatan struktur induk lemah (titik cair rendah), (4) terdapat cacat 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)



Gambar 2.12. Mekanisme difusi atom dalam logam, (a) dengan kekosongan, (b) dengan interstisi (Vlack, 1992)

2.3. Struktur Mikro

Secara mikro struktur logam tersusun atas butiran-butiran logam, tiap butir terdiri dari banyak atom yang mempunyai orientasi sama. Bentuk butir dalam bahan logam biasanya diatur oleh adanya butir-butir lain disekitarnya. Antara butir yang satu dengan butir yang lain mempunyai orientasi yang berbeda, yang dibatasi oleh batas butir. Batas butir dianggap berdimensi dua, bentuknya mungkin melengkung dan memiliki ketebalan antara 2 sampai 3 jarak atom. Ketidakseragaman orientasi antara butiran yang berdekatan menghasilkan tumpukan atom yang kurang efisien sepanjang batas. Oleh karena itu atom sepanjang batas butir memiliki energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang terdapat di dalam butir. Yang akhirnya akan mengakibatkan daerah perbatasan lebih mudah terkikis. Tumpukan yang lebih sedikit, pada batas butir memperlancar difusi atom, dan ketidakseragaman orientasi pada butir yang berdekatan mempengaruhi gerak dislokasi

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 2.13. Batas butir pada penampang besi cor yang dietsa
(Alexander, 1991)

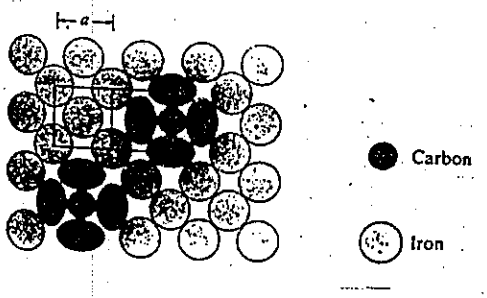
Ukuran butir juga turut menentukan sifat mekanik bahan. Semakin halus butiran penyusun suatu logam, maka logam tersebut makin keras; kekuatan luluh, keuletan, dan ketangguhan bahan juga semakin tinggi.

2.4. Baja Karbon

Baja didefinisikan sebagai paduan besi (Fe) dan karbon (C) dengan kadar karbon tidak melebihi 1,7% dari berat paduan . Menurut kadar berat karbon, maka baja karbon dapat dibagi dalam kelompok : (i) karbon rendah (C < 0,3%), (ii) karbon sedang (0,3% – 0,7%), (iii) karbon tinggi (0,7% – 1,7%).

Pada suhu di atas 912° C, terdapat daerah temperatur tertentu dimana besi mempunyai struktur kubik pemusatan sisi (f.c.c.). Pada kisi kubik pemusatan sisi (f.c.c.) terdapat ruang sisipan (*interstisi*) atau "lubang" yang agak besar pada pusat sel satuan. Karbon sebagai atom yang sangat kecil, dapat menduduki lubang tersebut dan membentuk larutan padat besi dan karbon.

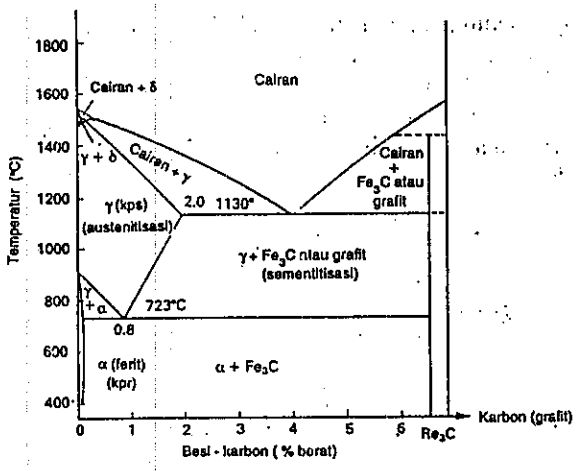
This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep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



Gambar 2.14. Larutan padat interstisi (karbon dalam besi f.c.c.)
(Vlack, 1991)

Diagram fase dari paduan besi-karbon ditunjukkan pada gambar 2.15. Perubahan polimorfi yang terjadi pada besi murni menyebabkan pembentukan tiga daerah fase tunggal yang berbeda paduan dengan kadar Fe tinggi : besi α atau *ferit* (b.c.c.), besi γ atau *austenit* (f.c.c.), dan besi δ (b.c.c.). Dari diagram fase paduan besi-karbon dapat diketahui bahwa fase *austenit* berawal dari titik 910° C untuk besi murni hingga 723° C untuk paduan dengan kadar karbon 0,8%. Seandainya paduan besi-karbon mengandung karbon lebih dari 0,8% didinginkan hingga mencapai garis batas γ, Fe_3C akan mengendap dengan laju sedemikian rupa sehingga pada suhu 723° C hanya tertinggal karbon sebanyak 0,8% sebagai larutan padat besi γ (*austenit*). Bila paduan besi-karbon dengan kadar karbon kurang dari 0,8% didinginkan hingga garis batas besi γ, maka besi α (*ferit*) akan memisah diri terlebih dahulu. Daya larut karbon dalam *ferit* bernilai rendah, karbon akan larut dalam *austenit* sedemikian rupa hingga pada suhu 723° C dicapai lagi larutan padat karbon 0,8%. Pada suhu 723° C, *austenit* yang mengandung karbon 0,8% bertransformasi dalam keadaan seimbang membentuk campuran dengan kadar *ferit* dan *sementit* tertentu yang disebut *perlit*.

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 2.15. Diagram fase paduan besi-karbon
(Alexander, 1991)

2.5. Tinjauan Plasma Secara Umum

Plasma adalah suatu fase dengan konsentrasi elektron dan ion yang hampir sama banyaknya. Meskipun plasma adalah gas yang terionisasi, tetapi tidak semua gas yang terionisasi merupakan plasma. Untuk disebut plasma, gas yang terionisasi tersebut harus memenuhi batasan konsentrasi elektron dan ion, yaitu sekurang-kurangnya dapat mempertahankan sifat netral jika mendapat gangguan dari luar.

Suatu gas terion dapat disebut plasma apabila memenuhi kriteria-kriteria tertentu. Syarat yang pertama adalah jika gas tersebut menjadi cukup padat sehingga λ_D jauh lebih kecil dari L, atau dapat ditulis :

$$\lambda_D << L \qquad (2.2)$$

dengan λ_D adalah panjang debye yaitu ukuran dari jarak *shielding* atau ketebalan *sheath* (cm), dan L adalah panjang gelombang dari sistem reaktor (cm).

Syarat yang kedua adalah bahwa di dalam awan bermuatan harus ada cukup banyak partikel. Jumlah partikel dalam lingkaran debye adalah

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)

$$N_D = n.\ \frac{4}{3}\cdot\pi\cdot\lambda_D^3 = 1380\ T^{\frac{3}{2}}\Big/ n^{\frac{1}{2}} \qquad (2.3)$$

Dengan n adalah jumlah partikel tiap satuan volume (partikel/cm^3), λ_D adalah panjang debye (cm), dan T adalah suhu plasma (^{o}K). Karena $\lambda_D << L$, "*collective behavior*" mengharuskan $N_D >> 1$.

Syarat yang ketiga adalah ionisasi partikel gas harus dilakukan dengan tumbukan. Jika ω adalah frekuensi dari osilasi plasma dan τ adalah rata-rata waktu tumbukan dengan atom netral, maka gas terion dapat dikatan sebagai plasma harus memenuhi $\omega\tau > 1$.

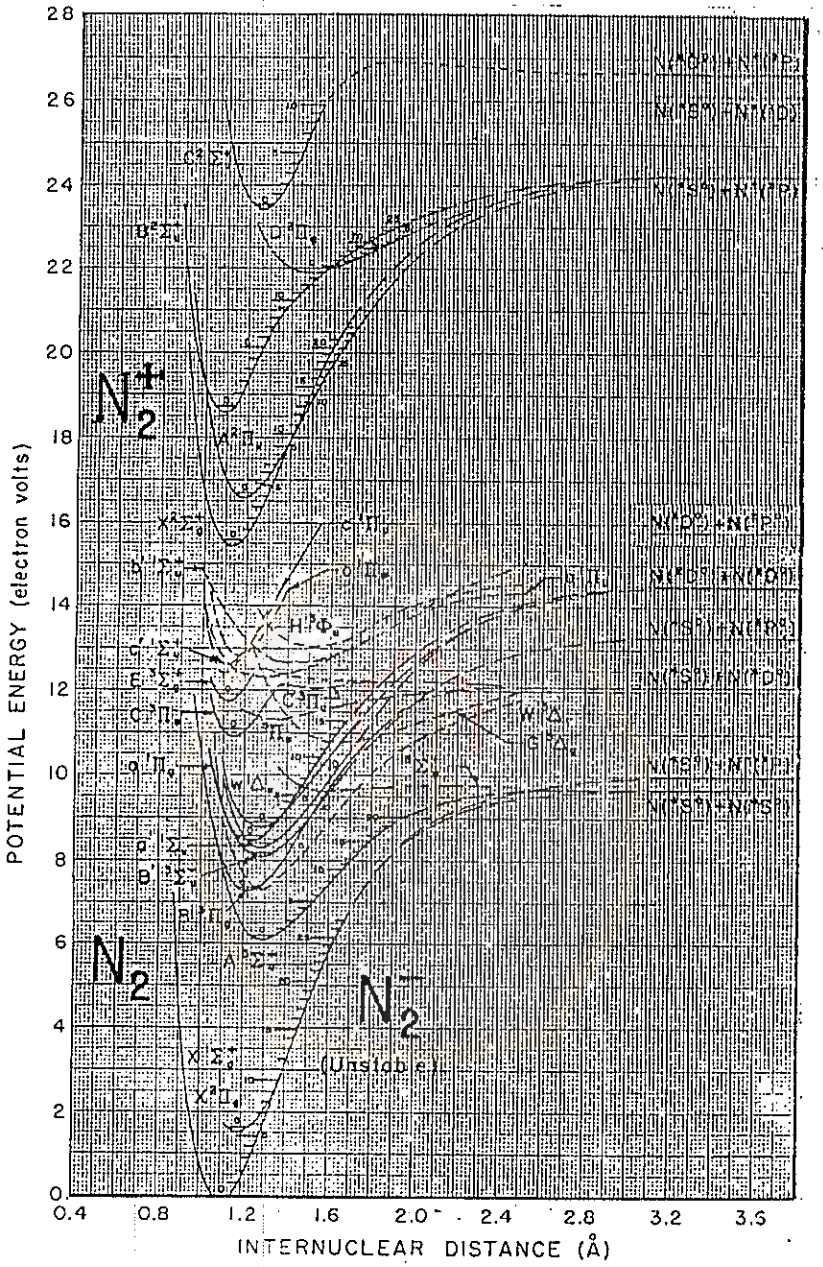
Proses ionisasi atom nitrogen dan molekul nitrogen oleh elektron penumbuk

$N + e \rightarrow N^+ + 2e$

$N_2 + e \rightarrow N^+ + N + 2e$

Besarnya energi ionisasi atom nitrogen 14,534 eV, sedangkan energi ionisasi untuk molekul N_2 sebesar 15,576 eV. Pada gambar 2.16 ditunjukkan kurva energi potensial dari N_2 dan N_2^+

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)

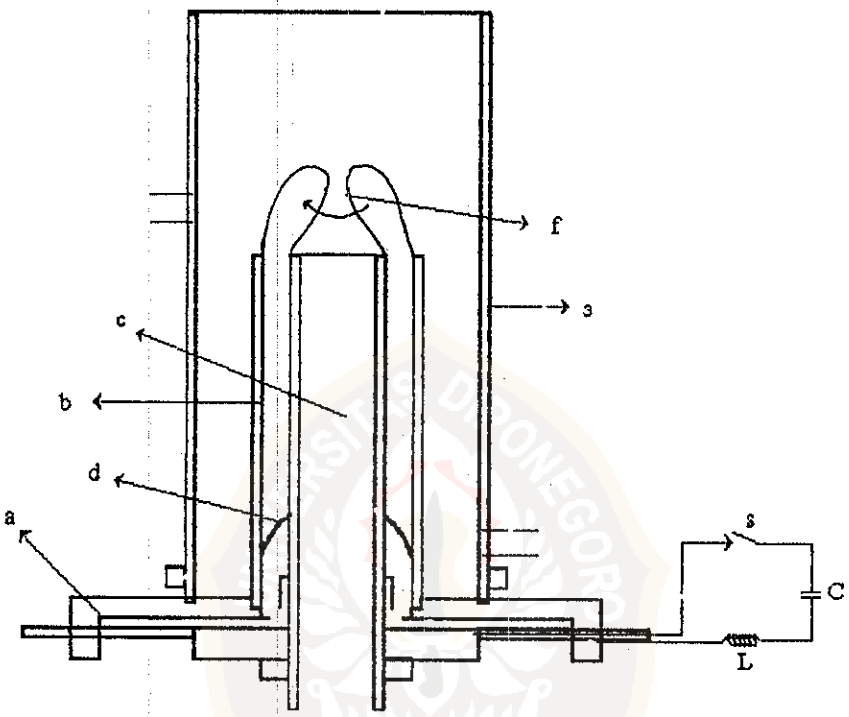


Gambar 2.16. Kurva energi potensial dari N_2 dan N_2^+
(Lofthus, 1992)

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)

2.6. Fokus Plasma

Plasma dengan kerapatan tinggi dapat diperoleh dengan menggunakan fokus plasma. Fokus plasma berupa tabung berbentuk dua silinder sepusat, silinder dalam sebagai anoda, dan silinder luar sebagai katoda.



Keterangan :

a. Dinding isolator	b. Katoda	c. Anoda
d. Selaput arus	e. Tabung	f. Plasma fokus

Gambar 2.17. Rangkaian alat fokus plasma (Suryadi, 1989)

Tahapan pembentukan plasma fokus jika ditinjau secara berurutan terbentuk melalui beberapa fase : fase lucutan, fase aksial, fase penjepitan radial, dan fase pembentukan ion.

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)

Fase lucutan

Setelah kapasitor C_o terisi, saklar S ditutup dengan menggunakan suatu sistem pemicu (triggering unit). Sehingga terjadi lucutan gas yang dimulai dari elektroda dalam yang merambat pada dinding isolator a dan menuju dinding belakang b. Sebagai akibat dari adanya arus pada elektroda dalam, maka timbul efek anti jepit (inverse pinch) yang mengangkat selaput arus dari permukaan isolator. Lucutan yang terjadi merambat sepanjang dinding isolator, yaitu dari anoda ke katoda.

Fase aksial

Arus dalam tabung fokus plasma membentuk suatu untai tertutup sehingga menimbulkan induksi diri yang berubah sebagai fungsi waktu sesuai dengan luas untai yang terbentuk. Tabung juga mempunyai tahanan yang disebabkan oleh selaput arus. Tahanan selaput arus merupakan fungsi suhu, dimana suhu merupakan fungsi waktu.

Selaput arus dianggap sebagai penghantar sempurna dan berbentuk garis lurus. Arus pada anoda menimbulkan medan magnet induksi B. Karena adanya gaya lorentz akibat interaksi antara medan magnet dengan selaput arus, maka selaput arus akan mendorong gas yang ada di depannya sehingga timbul gelombang kejut. Gelombang kejut tersusun oleh muka gelombang, daerah peralihan, dan piston (selaput arus berfungsi sebagai piston) (Suryadi, 1989).

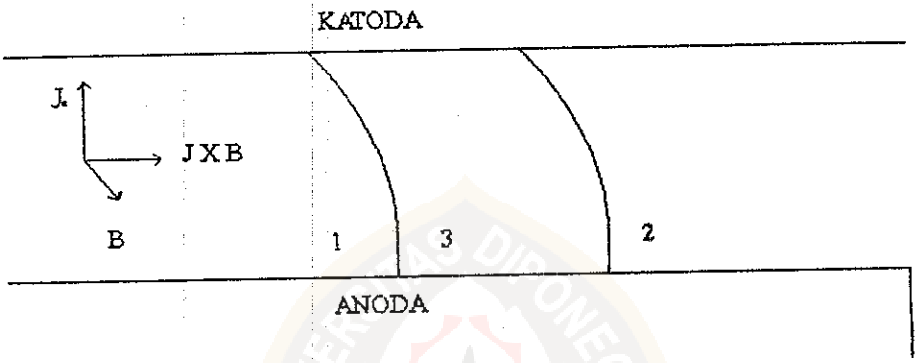
Gerak selaput arus sepanjang tabung atau fase aksial, sangat menentukan efek jepit yang terjadi. Pada saat mencapai ujung anoda akan terjadi efek jepit, dimana akan terjadi pula pemanasan molekul-molekul gas yang tersapu oleh piston

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)

sehingga akan terbentuk plasma. Berdasarkan kriteria Bennet, suhu molekul-molekul atau atom-atom gas sebanding dengan kuadrat arus (Widanarto, 1995) :

$$I^2 \sim NkT \qquad (2.4)$$

dengan I adalah arus yang mengalir dalam rangkaian (kA), N adalah jumlah partikel persatuan massa (partikel/kg), k adalah konstanta Boltzmann (1,381 x 10^{-23} J/K), dan T adalah suhu gas (°K)



Gambar 2.18. Selaput arus dalam tabung fokus plasma, (1) piston, (2) muka gelombang, (3) daerah peralihan (Suryadi, 1989)

Pada saat kompresi maksimum, akan terjadi turbulensi sehingga daya hantar plasma menjadi kecil. Kondisi ini akan memungkinkan medan magnet dibelakang piston untuk berdifusi ke dalam plasma dan memanaskannya. Suhu plasma yang tinggi pada saat terjadi efek jepit, dapat diperoleh dengan cara mengusahakan agar arus dan medan magnet mencapai maksimum pada saat gelombang kejut mencapai ujung tabung.

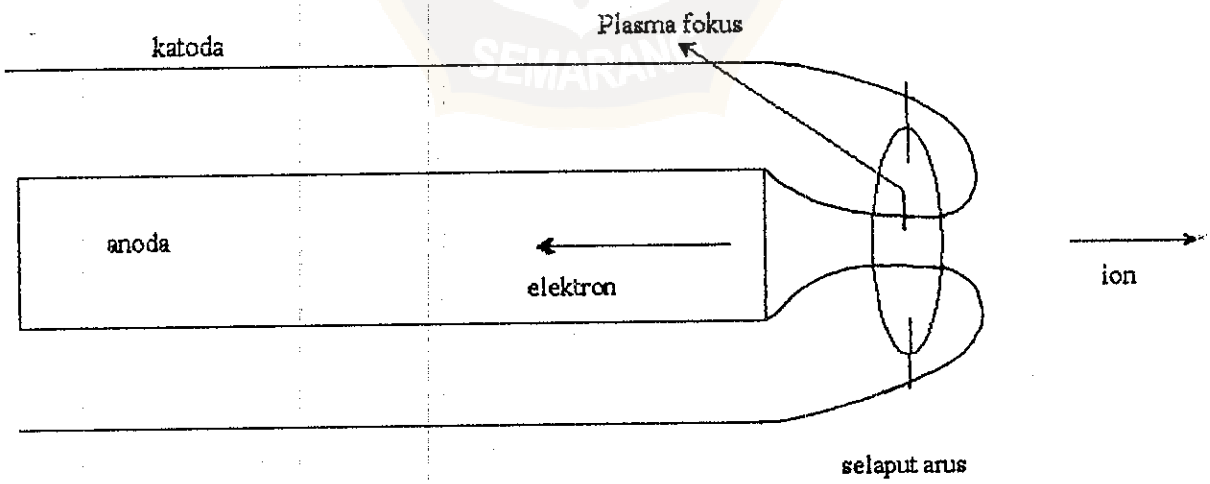
Fase penjepitan radial

Setelah selaput arus mencapai ujung tabung, karena pengaruh medan magnet yang ditimbulkannya, maka akan terjadi suatu gerak radial yang mengakibatkan

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)

terjadinya efek jepit. Terjadinya efek jepit dalam tabung fokus plasma ditandai dengan adanya penurunan arus (*current dip*) dan juga lonjakan tegangan. Pada fase penjepitan radial ini terjadi perubahan tenaga magnet menjadi tenaga plasma (termal dan kinetik). Pada saat yang sama juga akan terjadi tumbukan tumbukan antara plasma yang terdapat dalam selaput arus dan gas yang terdapat di depannya, sehingga akan terjadi pemindahan tenaga dari plasma pada selaput arus kepada molekul gas dan mengakibatkan terjadinya pemanasan. Karena sistim ini merupakan sistim terbuka, maka selama proses akan terjadi gerakan ion dan elektron sepanjang sumbu Z, dan meninggalkan sistem.

Dinamika fase penjepitan radial dapat digambarkan sebagai berikut. Setelah berakhirnya fase aksial akan terjadi kompresi ke arah radial karena adanya medan magnet yang ditimbulkan oleh arus itu sendiri, sehingga gelombang kejut yang tersusun oleh muka gelombang dan piston akan menyapu gas yang ada di depannya. Gelombang kejut akan berhenti pada saat muka gelombang dari berbagai arah menumbuk sumbu tabung.



Gambar 2.19. Gerak selaput arus dalam fase penjepitan radial (Suryadi, 1989)

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)

Fase pembentukan ion

Dari gerak selaput arus dalam fase penjepitan radial (gb 2.19.) dapat terlihat bahwa ion yang ada dalam plasma akan dipercepat menjauhi anoda dan elektron akan ditarik menuju ke anoda. Proses percepatan terjadi pada saat terjadi "dip", jadi percepatan yang dialami ion disebabkan oleh adanya tegangan induksi (Suryadi, 1989).

Rapat energi kinetik ion (e_I) akibat pemanasan dapat dinyatakan (Widanarto, 1995)

$$e_I = \frac{3}{2} n_I k T \qquad (2.5)$$

sehingga sumbangan enegi ion dalam bentuk energi kinetik (E_K)

$$E_K = \frac{3}{2} n_I k T V \qquad (2.6)$$

Sumbangan energi ion akibat dipercepat induksi medan listrik dan kompresi magnetik (E_{Km})

$$E_{Km} = \frac{1}{2} m_I v_I \qquad (2.7)$$

dengan k adalah konstanta Boltzmann (1,381 x 10^{-23} J/K), m_I adalah massa ion (kg), n_I adalah banyaknya ion per volume (partikel/cm^3), v_I adalah kecepatan ion (cm/detik), T adalah suhu plasma (°K), dan V adalah volume kolom plasma fokus (cm^3).

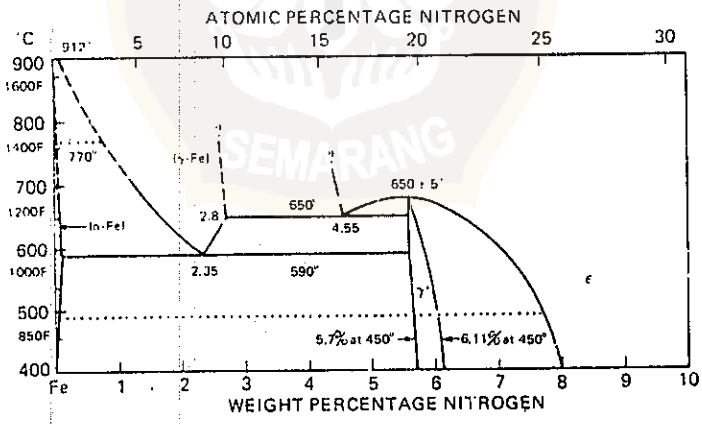
2.7. Kerusakan Radiasi

Jika berkas ion berenergi tinggi ditembakkan pada permukaan material, maka akan terjadi kerusakan struktur material tersebut. Rusaknya struktur material

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)

disebabkan karena berkas ion yang berenergi tinggi menumbuk atom-atom material, sehingga atom-atom itu akan bergeser atau terpental. Atom-atom yang bergeser atau terpental itu akan menumbuk atom-atom lain yang ada di sebelahnya. Tumbukan seperti itu akan terjadi berulang-ulang, sampai atom-atom tersebut kehabisan energi, karena setiap kali terjadi tumbukan, atom-atom itu akan kehilangan energi. Karena atom-atom itu kehilangan energi secara terus-menerus, maka suatu saat akan kehabisan energi, dan akhirnya berhenti menempati ruang kosong antara atom-atom material.

Ion-ion yang masuk ke dalam material juga akan kehilangan energi, dan akhirnya berhenti menempati ruang kisi antar-atom (*interstisi*). Karena kerapatan atomnya bertambah, maka kekerasan material tersebut juga akan meningkat. Bila ion-ion nitrogen ditembakkan pada besi (Fe) pada kondisi tertentu ion-ion nitrogen tersebut akan membentuk fase baru, yaitu fase Fe-N



Gambar 2.20. Diagram fase Fe-N (Leslie, 1982)

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)

2.7.1 Interaksi berkas partikel dengan material

Apabila suatu berkas partikel bergerak dengan energi kinetik E_o dan mempunyai intensitas I_o menumbuk permukaan material, maka ada dua jenis fenomena makroskopis yang dapat terjadi yaitu penyerapan berkas secara total oleh material, dan penembusan material oleh berkas partikel.

Penyerapan berkas secara total oleh material

Berkas ion yang datang menumbuk atom-atom dari material, sehingga atom-atom tersebut bergeser atau terpental. Saat terjadi tumbukan, ion akan kehilangan energi dan akhirnya berhenti. Secara matematis, energi total ion yang hilang tiap satuan panjang selama bergerak di dalam material target adalah (Maharta, 1997) :

$$-\left[\frac{dE}{dx}\right]_t = \left\{\left[\frac{dE}{dx}\right]_n + \left[\frac{dE}{dx}\right]_e\right\} \tag{2.8}$$

dengan $\left[\frac{dE}{dx}\right]_t$ adalah kehilangan energi total (eV/cm), $\left[\frac{dE}{dx}\right]_n$ adalah kehilangan energi nuklir (inti) (eV/cm), dan $\left[\frac{dE}{dx}\right]_e$ adalah kehilangan energi elektronik (eV/cm).

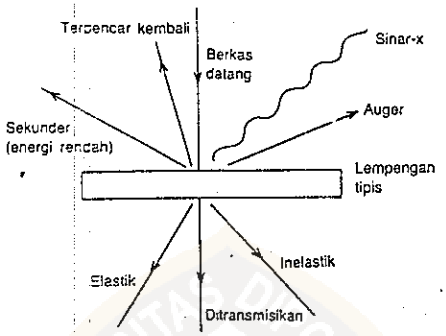
Penembusan material oleh berkas partikel

Berkas ion yang datang memiliki energi yang cukup, sehingga mampu menembus material. Intensitas berkas setelah menembus material lebih rendah dibandingkan dengan intensitas mula-mula.

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)

2.8 *Scanning Electron Microscope* (*SEM*)

Scanning Electron Microscope (*SEM*) adalah peralatan yang digunakan untuk melihat struktur mikro permukaan logam. Prinsip kerja dari *SEM* adalah dengan memanfaatkan hamburan balik dan pantulan sekuder dari berkas elektron, setelah berkas elektron tersebut berinteraksi dengan materi.



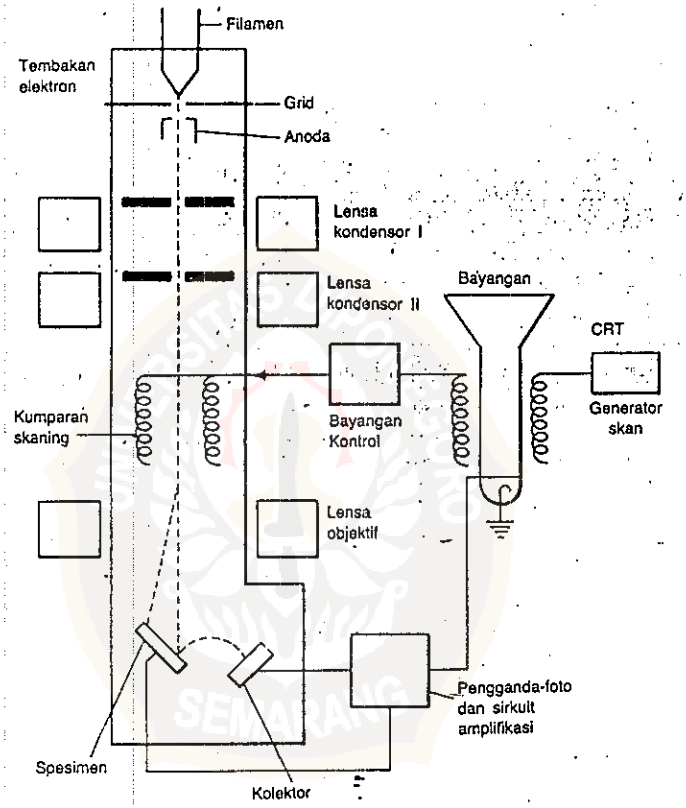
Gambar 2.21. Interaksi berkas elektron dengan materi (Smallman, 1991)

Karena elektron-elektron sekunder memiliki energi yang rendah, maka elektron-elektron tersebut dapat dibelokkan membentuk sudut dan menimbulkan bayangan topografi (Smallman, 1991). Intensitas hamburan balik semakin besar sesuai dengan naiknya nomor atom sampel. Oleh karena itu daerah sampel dengan nomor atom rata-rata tinggi akan terlihat relatif lebih terang daripada daerah dengan nomor atom rata-rata rendah.

Diagram skematik dari *SEM* ditunjukkan pada gambar 2.22. Tembakan elektron menghasilkan berkas elektron untuk difokuskan ke suatu titik dengan diameter ≈ 100 $\mathring{A}$. Elektron yang mengenai benda uji akan berinteraksi, sehingga akan menghasilkan sinar–X , elektron, dan foton. Berkas yang dihasilkan diteruskan

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)

melalui pipa sinar pantulan ke suatu alat pembesar foto dan sinyal yang didapat digunakan untuk memodulasikan terangnya suatu titik osiloskop yang melalui suatu raster dengan adanya persesuaian dengan berkas sinar elektron pada permukaan benda uji (Smallman, 1991).



Gambar 2.22. Diagram skematik *SEM* (Smallman, 1991)

2.9 Uji Kekerasan Mikro

Kekerasan suatu bahan didefinisikan sebagai ketahanan terhadap penetrasi. Uji kekerasan yang sering digunakan adalah uji kekerasan *vickers* dan uji kekerasan

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)

knoop. Uji kekerasan dilakukan dengan cara membuat jejak dengan menggunakan beban (identor) yang terbuat dari intan. Pada uji kekerasan *vickers*, jejak yang dibuat identor berupa bujursangkar, dengan panjang diagonal-diagonalnya 1 : 1. Pada uji kekerasan *knoop*, jejak yang dibuat identor berupa piramida, dengan perbandingan diagonal panjang dan pendek 7 : 1. Pada penelitian ini dipilih uji kekerasan *knoop*, karena dengan bentuk yang sedemikian rupa, identor *knoop* memberikan kemungkinan memberikan lekukan yang lebih rapat dibandingkan lekukan *vickers*. Selain itu luas jejak identor *knoop* kira-kira hanya 15% dari luas jejak identor *vickers* untuk panjang diagonal yang sama. Sehingga uji kekerasan *knoop* sangat cocok apabila digunakan untuk mengukur kekerasan bahan getas, di mana kecenderungan terjadinya patah sebanding dengan volume bahan-bahan yang ditegangkan. Angka kekerasan *knoop* (KHN) dapat ditentukan dari persamaan (*Micro Hardness Tester MXT 70 Mitsuzawa*) :

$$\text{KHN} = 14{,}23\ \frac{P}{L_d^2} \qquad (2.9)$$

dengan KHN adalah angka kekerasan mikro (gf/μm^2), P adalah beban yang diterapkan (gf), dan L_d adalah panjang diagonal yang lebih panjang (mm).

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)