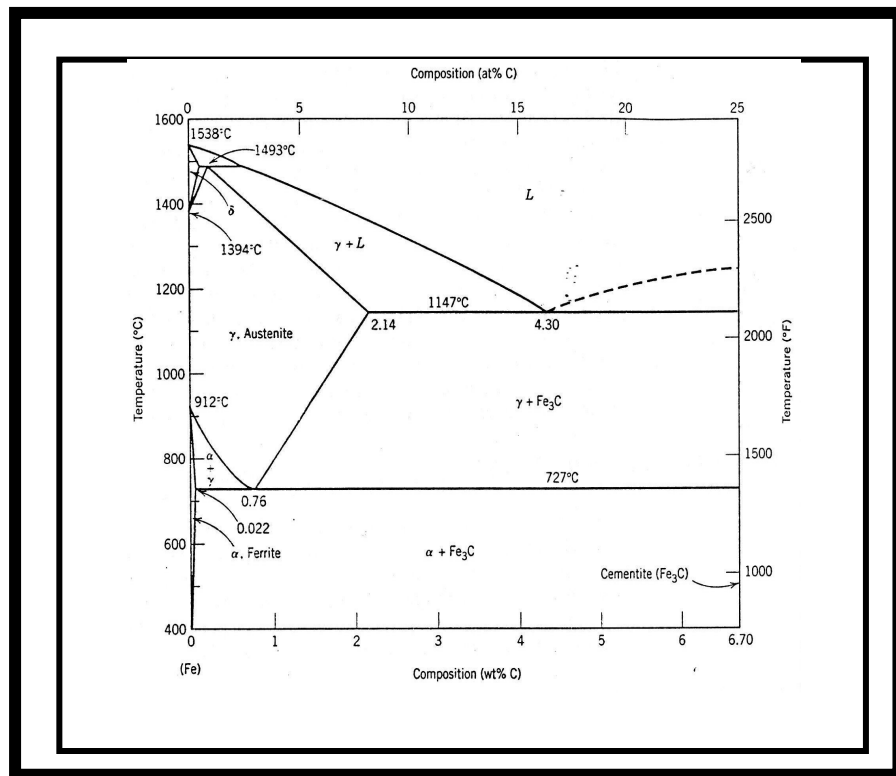


DIKTAT KULIAH

STRUKTUR DAN SIFAT MATERIAL



JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS DARMA PERSADA
2010

DIKTAT KULIAH

STRUKTUR DAN SIFAT MATERIAL

Disusun :

ASY'ARI DARYUS

Jurusan Mesin Fakultas Teknik
Universitas Darma Persada
Jakarta.

KATA PENGANTAR

Dalam rangka memperlancar kegiatan pendidikan di Fakultas Teknik Universitas Darma Persada, maka diperlukan buku-buku pelajaran baik yang berbahasa Indonesia ataupun bahasa Inggris.

Diktat/buku ini disusun sebagai sumbangan satu lagi buku ajaran yang ditujukan untuk membantu mahasiswa jurusan teknik mesin dan teknik industri, khususnya bagi yang mengikuti kuliah Struktur dan Sifat Material.

Isu buku ini meliputi pokok-pokok kuliah Struktur dan Sifat Material yang antara lain terdiri dari teori dislokasi, slip, metode penguatan logam, kegagalan, sifat listrik, sifat magnet, dan sifat optik.

Penulis sadari bahwa buku ini masih jauh dari sempurna, maka kritik dan saran yang bertujuan memperbaiki isi buku ini akan diterima dengan senang hati. Kepada semua pihak yang telah memberikan bantuannya sehingga buku ini dapat diterbitkan, penulis ucapkan banyak-banyak terima kasih.

Jakarta, November 2010

Asy'ari Daryus

DAFTAR ISI

BAB I	: Alat Bantu Metalurgi.	1
BAB II	: Pengujian-pengujian Pada Material.	16
BAB III	: Dislokasi dan Mekanisme Penguatan.	31
BAB IV	: Failure (Kegagalan).	49
BAB V	: Sifat Listrik.	68
BAB VI	: Sifat Termal.	81
BAB VII	: Sifat Magnet.	87
BAB VIII	: Sifat Optik.	92

BAB I

ALAT BANTU METALURGI

Pengukuran Temperatur

Pyrometer digunakan untuk mengukur temperatur tinggi, biasanya diatas 510 °C. Sedangkan termometer digunakan untuk mengukur temperatur dibawah 510 °C.

Salah satu cara yang paling sederhana memperkirakan temperatur sebuah logam adalah dengan memperhatikan warna dari benda panas tersebut. Tabel 1 memperlihatkan secara sederhana hubungan warna dengan temperatur suatu logam dengan temperatur.

Tabel 1. Variasi warna berdasarkan temperatur.

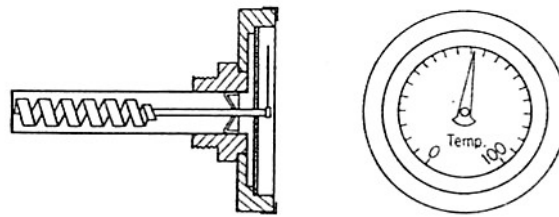
Warna	Temperatur, °C
Merah	510
Merah tua	621
Merah jambu tua	635
Merah jambu	704
Merah jambu muda	802
Oranye tua	899
Oranye	954
Kuning	982

Penentuan temperatur dengan mengamati warna seperti tabel diatas hanya merupakan perkiraan kasar saja. Jika penunjukan atau pencatatan temperatur yang kontinyu diperlukan, maka instrumen untuk ini bisa dibagi atas dua klasifikasi umum yaitu: (1) sistem mekanik yang berhubungan dengan ekspansi logam, cairan, gas atau uap, (2) sistem listrik yang berhubungan dengan tahanan, termokopel, radiasi dan pirometer optik.

Termometer Ekspansi Logam

Sebagian besar logam akan berekspansi jika dipanaskan dan besarnya ekspansi bergantung pada temperatur dan koefisien ekspansi. Prinsip ini digunakan pada *strip dwilogam* yang terbuat dari logam berekspansi tinggi disatu sisi dan logam berekspansi rendah disisi lain. Ketika terjadi perubahan kecil temperatur, strip akan melengkung dan membuat atau memutus rangkaian listrik yang pada akhirnya akan mengontrol pemanasan atau pendinginan pada sebuah ruangan. Pada penggunaan di industri, strip

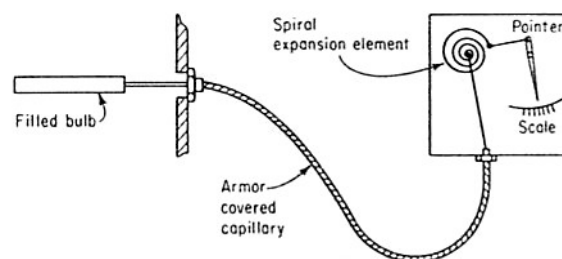
dwi-logam biasanya melengkung ke dalam bentuk koil, dimana satu ujungnya tetap dan ekspansi akan membuat gerakan putar (gambar 1.1).



Gambar 1.1. Indikator temperatur dengan elemen bimetal heliks.

Termometer Ekspansi Cairan

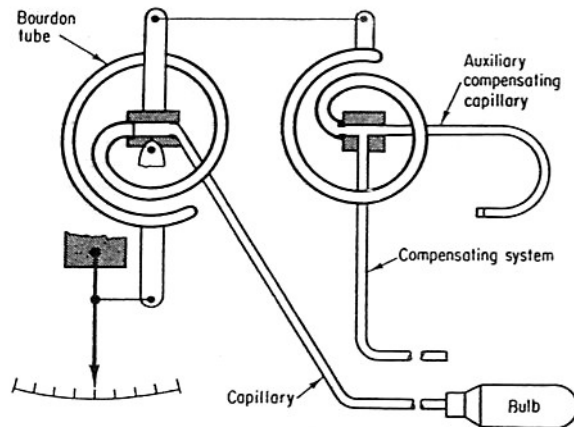
Alat ukur ekspansi cairan, seperti juga pada tekanan gas atau tekanan uap, terdiri dari *bulb* yang bersentuhan dengan benda yang diukur dan piranti yang berekspansi, biasanya tabung Bourdon, yang akan mengoperasikan alat penunjuk atau pena pencatat. *Bulb* dan tabung bourdon dihubungkan dengan pipa kapiler dan diisi dengan media yang sesuai (gambar 1.2).



Gambar 1.2. Sistem termal sederhana untuk pengukuran temperatur.

Perubahan temperatur pada *bulb* akan menyebabkan cairan berekspansi atau berkontraksi, yang akan menyebabkan tabung Bourdon berekspansi atau berkontraksi. Gambar 1.3 memperlihatkan termometer ekspansi cairan terkompensasi menggunakan sistem duplikasi, diatur sedemikian sehingga gerakan bisa dikurangi. Beberapa jenis cairan yang digunakan dan temperatur kerjanya adalah sbb:

- Raksa - 1,6 s/d + 510 °C
- Alkohol - 43,3 s/d +71 °C
- Pentana -165,5 s/d +29,4 °C
- Kreosote -6,6 s/d +204,4 °C



Gambar 1.3. Termometer ekspansi cairan terkompensasi.

Termometer Tekanan Uap atau Gas

Pada termometer tekanan uap, cairan yang mudah menguap sebagian mengisi *bulb*. Temperatur yang berbeda pada *bulb* akan menyebabkan perubahan tekanan pada uap jenuh diatas permukaan cairan di *bulb*. Perubahan tekanan akan diteruskan ke tabung Bourdon, indikasi tekanan berlaku sebagai ukuran temperatur pada *bulb*. Jangkauan pengukuran temperatur berkisar dari -15° hingga $+260^{\circ}\text{C}$. Cairan yang umum digunakan adalah : methyl clorida, ether, ethyil alkohol dan toluene.

Termometer tekanan-gas sejenis dengan termometer tekanan-uap kecuali bahwa sistem diisi dengan gas, biasanya hidrogen. Jangkauan temperatur yang diukur oleh termometer tekanan-gas adalah dari -93° hingga $+427^{\circ}\text{C}$.

Termometer Tahanan

Prinsip termometer tahanan adalah adanya kenaikan tahanan listrik dengan adanya kenaikan temperatur pada suatu konduktor. Jika variasi tahanan-temperatur sebuah logam telah dikalibrasi, adalah mungkin untuk menentukan temperatur dengan mengukur tahanan listrik.

Tahanan dibentuk oleh *koil* yang bahannya biasanya terbuat dari : tembaga, nikel atau platinum. Nikel dan tembaga bisa mengukur temperatur antara $+66$ hingga $+260^{\circ}\text{C}$, sedangkan platinum bisa digunakan antara -212 hingga $+593^{\circ}\text{C}$. Termometer tahanan sangat akurat dan peralatan sangat penting di laboratorium.

Pyrometer Termoelektrik

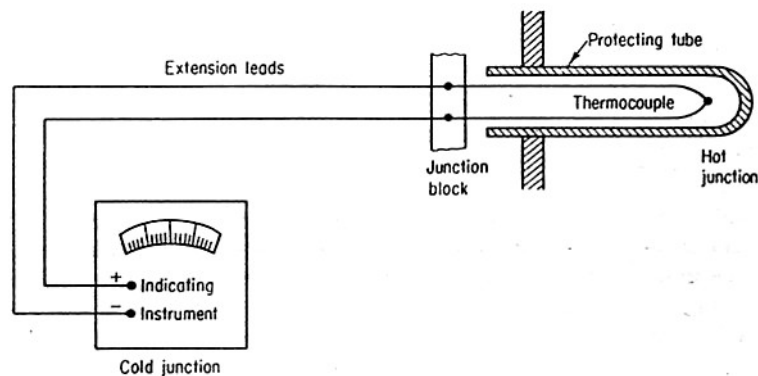
Alat ini banyak digunakan untuk pengontrolan dan pengukuran temperatur metalurgi. Alat ini bisa mengukur hingga suhu 1650°C . Alat Pirometer termoelektrik sederhana ditunjukkan oleh gambar 1.4 yang terdiri dari unit-unit berikut:

1. Termokopel, terdiri dari dua logam atau paduan yang berbeda.
2. Blok pertemuan, berada diluar *furnace* (dapur pemanas).
3. Extension lead.
4. Instrumen penunjuk atau perekam.

Operasi pirometer ini berdasarkan dua prinsip:

Efek Peltier. Jika dua logam yang berbeda dihubungkan secara listrik, GGL (gaya gerak listrik) akan timbul pada titik pertemuan. Besar GGL tergantung pada komposisi kimia kawat dan temperatur titik pertemuan.

Efek Thompson. Jika ada perbedaan temperatur antara ujung sebuah kawat homogen, akan timbul GGL antara ujungnya. Besarnya GGL tergantung pada komposisi, keseragaman kimia kawat dan perbedaan temperatur.



Gambar 1.4. Pyrometer termoelektrik sederhana.

GGL total dari pirometer termoelektrik kadang-kadang disebut *Efek Seebeck*, yaitu jumlah aljabar dari 4 GGL, dua adalah GGL Peltier pada pertemuan panas (hot junction) dan dingin (cold junction), dan dua adalah GGL Thompson sepanjang kawat.

Pertemuan dingin, atau pertemuan rujukan, mesti dijaga pada temperatur konstan, biasanya 0 °C, sehingga GGL yang diukur pada sirkuit pirometer adalah fungsi temperatur pertemuan panas.

Material Termokopel

Chromel-Alumel. Chromel (90% nikel, 10% chrom) vs Alumel (94% nikel, 3% mangan, 2% Al, 1% Si) banyak digunakan diindustri. Sangat baik digunakan pada temperatur dari 649 hingga 1204 °C.

Besi-Konstantan. Konstantan adalah paduan yang mengandung kira-kira 54% tembaga dan 46% nikel. Kombinasi ini bisa digunakan untuk temperatur dari 149 hingga 760 °C.

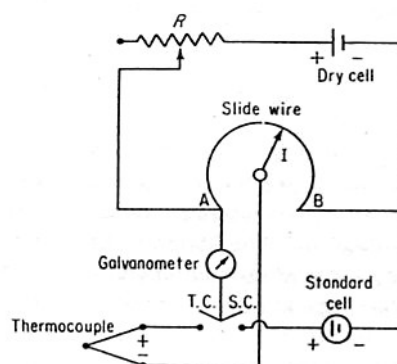
Tembaga-Konstantan. Paduan konstantan yang digunakan disini sedikit berbeda dengan konstantan yang digunakan pada kombinasi besi-konstantan. Konstantan mengandung sejumlah kecil mangan dan besi. Jangkauan pengukuran dari -251 hingga $+315,5$ °C.

Platinum, 10% Rhodium-Platinum. Ini adalah termokopel logam mulia. Digunakan untuk mengukur temperatur tinggi. Bisa digunakan untuk jangkauan temperatur dari 0 hingga 1649 °C.

Pengukuran GGL

Temperatur pada pertemuan panas ditentukan dengan pengukuran GGL yang dibangkitkan oleh sirkuit. Sebuah potensiometer adalah salah satu instrument yang akurat untuk mengukur GGL yang kecil. Prinsipnya, GGL yang dibangkitkan oleh termokopel dibandingkan dengan GGL yang diketahui dan diukur terhadap standar ini.

Sirkuit potensiometer penunjukan langsung sederhana ditunjukkan oleh gambar 1.6 dibawah ini. Arus dari sel kering (dry cell) dilewatkan melalui sirkuit utama yang terdiri dari kawat luncur (slide wire) dan tahanan geser R . Kawat luncur AB merupakan kawat tahanan seragam. Dengan polaritas sel kering seperti yang ditunjukkan, terdapat penurunan tegangan pada kawat luncur AB yang besarnya tergantung pada arus yang mengalir padanya dari sel kering. Untuk menstandarkan penurunan tegangan pada AB dengan penunjukkan skala, sel standar dengan tegangan tetap dipasang pada sirkuit dengan menutup switch ke posisi S.C. Harap diperhatikan bahwa polaritas tegangan sel standar dibuat sedemikian sehingga arus yang keluar dari sel kering akan berlawanan dengan arus yang keluar dari sel kering. Tahanan R diatur supaya arus-arus ini sama sehingga tidak ada arus akan mengalir pada sirkuit, dan ditunjukkan dengan bacaan nol pada galvanometer.



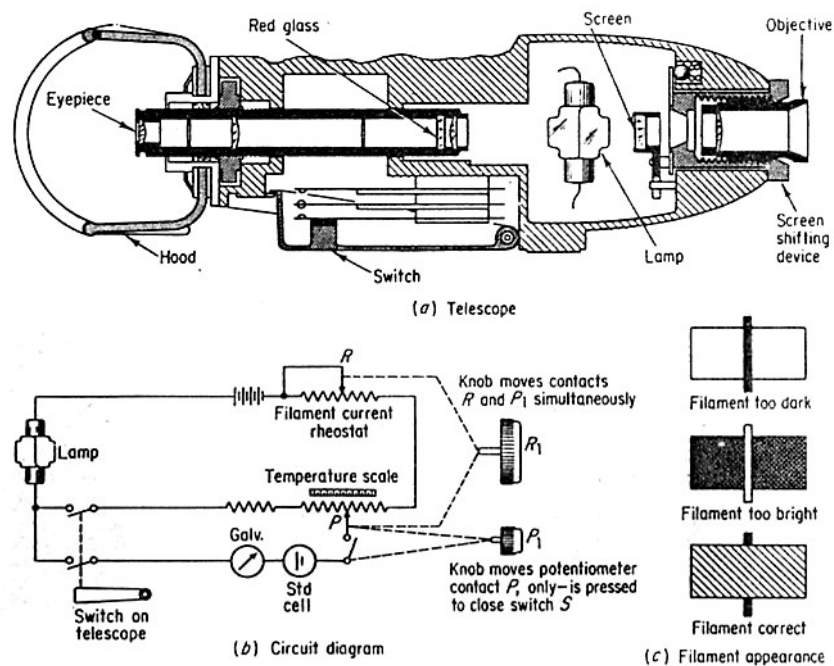
Gambar 1.6. Potensiometer Penunjuk langsung.

Jika GGL termokopel akan diukur, ia akan menggantikan sel standar dengan menggerakkan switch ke posisi TC. Sirkuit di seimbangkan tidak dengan menggeser tahanan R tetapi dengan mengatur tahanan kawat luncur. Pengaturan ini dilakukan sampai penunjukkan pada galvanometer nol. Bacaan yang terbaca pada kawat luncur yaitu tegangan dalam skala milivolt adalah bersesuaian dengan temperatur pada termokopel (atau angka temperatur terbaca langsung pada penunjuk).

Pirometer Optik

Pirometer optik adalah pirometer yang bekerja pada panjang gelombang tunggal di spektrum cahaya tampak. Pirometer optik mengukur temperatur dengan cara membandingkan kecerahan cahaya yang dipancarkan oleh sumber yang diukur dengan sumber standar. Untuk membuat perbandingan warna lebih mudah, filter merah digunakan yang menyaring radiasi hanya untuk panjang gelombang warna merah.

Jenis yang paling banyak digunakan di industri adalah jenis *disappearing-filament* (filamen tak tampak). Pirometer ini terdiri dari dua bagian, sebuah teleskop dan kotak pengatur. Teleskop (gambar 1.8a) terdiri dari filter gelas merah yang dipasang dimuka lubang intip (eyepiece) dan sebuah lampu dengan filamen yang telah dikalibrasi dimana lensa objektif memfokuskan gambar dari benda yang diukur. Alat juga mempunyai saklar (switch) yang berfungsi sebagai penghubung rangkaian ke lampu, dan sebuah layar absorpsi untuk mengubah jangkauan pirometer.



Gambar 1.8. Pirometer optik jenis filamen tak tampak. (a) Teleskop. (b) Filamen yang tampak.

Kotak pengatur berisikan komponen-komponen utama sirkuit pengukur yang ditunjukkan oleh gambar 8b. Termasuk diantaranya sel kering untuk memberikan arus ke lamp iluminasi, sebuah rheostat R untuk mengatur arus filamen, dan sebuah potensiometer. Arus secara manual diatur dengan memutar R_1 sampai filamen mencapai kecerahan citra objek yang dilihat dan filamen menjadi tak terlihat (gambar 1.8c). Keseimbangan yang akurat dicapai dengan memutar P_1 hingga bacaan pada galvanometer nol. Skala yang terpasang pada P menunjukkan langsung temperatur yang diukur.

Jangkauan temperatur pada pirometer optik berkisar dari 760 hingga 1316 °C. Batas atas pirometer ini bisa ditingkatkan sampai 5538 °C dengan penyesuaian pada komponennya.

Metalografi

Metalografi atau mikroskopi terdiri dari pembahasan mikroskopik dari karakteristik struktur sebuah logam atau sebuah paduan. Mikroskop adalah perkakas yang penting bagi ahli metalurgi baik dari sisi keilmuan ataupun dari sisi teknik. Adalah mungkin menentukan besar butir serta ukuran, bentuk, distribusi berbagai fase dan inklusi yang mempunyai efek besar pada sifat mekanik logam. Struktur mikro akan menunjukkan perlakuan mekanik dan termal dari logam, dan adalah mungkin untuk memperkirakan sifat yang diinginkan dari material berdasarkan kondisi-kondisi struktur mikro yang ada.

Pengalaman membuktikan bahwa suksesnya mempelajari hal-hal mikroskopik sangat bergantung pada perhatian yang diberikan dalam mempersiapkan spesimen. Mikroskop yang canggih sekalipun tidak akan bisa menampilkan struktur spesimen yang dipersiapkan dengan tidak baik. Tujuan dalam persiapan spesimen adalah membuat spesimen tersebut rata, bebas goresan dan permukaannya seperti kaca. Langkah-langkah yang harus dilakukan diuraikan seperti berikut ini.

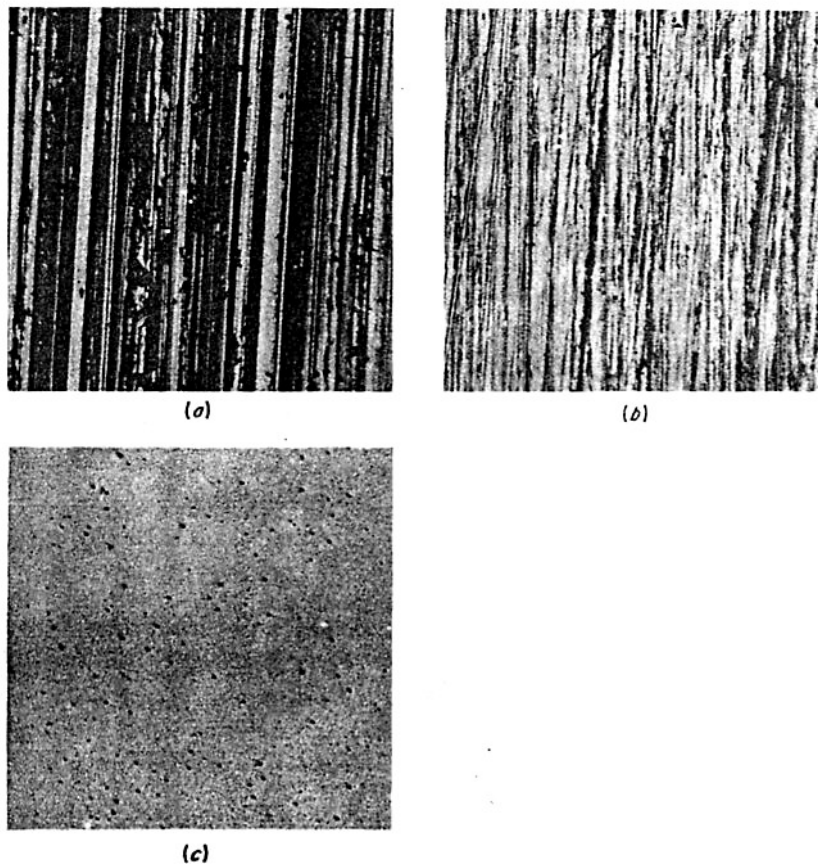
Sampling

Pemilihan sampel yang akan diperiksa adalah merupakan hal yang penting. Jika “kegagalan” yang akan diamati, sampel harus dipilih sedekat mungkin dengan daerah kegagalan dan harus dibandingkan dengan daerah yang normal.

Jika materialnya lunak, seperti logam bukan besi, sampel bisa diperoleh dengan penggergajian manual. Jika materialnya keras, pengambilan sampel dilakukan dengan menggunakan alat potong “abrasiv”. Spesimen harus tetap dingin selama pemotongan.

Penggerindaan kasar.

Jika mungkin, ukuran spesimen dibuat dengan ukuran yang mudah untuk ditangani. Sampel yang lunak bisa dibuat datar dengan menggerakkannya secara pelan naik turun sepanjang permukaan pahat rata halus. Spesimen lunak dan keras bisa digerinda kasar dengan sabuk berpasir, dengan spesimen dijaga tetap dingin dengan secara berkala menjatuhkan air selama penggerindaan. Pada semua operasi penggerindaan dan penggosokan, spesimen harus digerakkan tegak lurus terhadap goresan yang ada. Penggerindaan kasar diteruskan hingga sampai permukaan rata dan bebas dari takikan, dsb, dan semua goresan yang disebabkan oleh penggergajian atau pemotongan sudah tidak ada. (permukaan setelah digerinda kasar ditunjukkan oleh gambar 10a).



Gambar 1.10. (a) Permukaan setelah penggerindaan kasar, pembesaran 100X. (b) Permukaan setelah pemolesan pada kertas 4/0, pembesaran 100X. (c) Permukaan bebas gores setelah pemolesan akhir, pembesaran 50X. Titik hitam adalah impuritas oksida.

Mounting (pemegangan)

Spesimen yang kecil atau bentuk yang tak beraturan harus dipegang untuk memudahkan penggosokan antara dan penggosokan akhir. Kawat, tongkat kecil,

spesimen logam lembaran, penampang tipis dsb, mesti dipegang dengan material yang cocok atau secara kaku diklem dengan pemegang mekanis.

Penggosokan antara

Setelah dipegang, spesimen digosok dengan kertas amplas yang berurutan dari kasar ke halus. Kertas amplas pertama biasanya No. 1, kemudian 1/0, 2/0, 3/0 dan terakhir 4/0.

Permukaan setelah penggosokan antara ditunjukkan oleh gambar 10b. Pengamplasan ini biasanya dilakukan kering. Pada material yang lebih lunak, biasanya digunakan amplas silikon karbida. Bila dibandingkan dengan amplas biasa, amplas silikon karbida mempunyai laju pembuangan yang lebih besar dan karena mempunyai senyawa resin, amplas ini bisa digunakan bersama-sama dengan pelumas. Pelumas akan mencegah panas berlebihan pada sampel, meminimalkan corengan pada logam lunak, dan membersihkan sampel dari kotoran dari amplas.

Penggosokan akhir

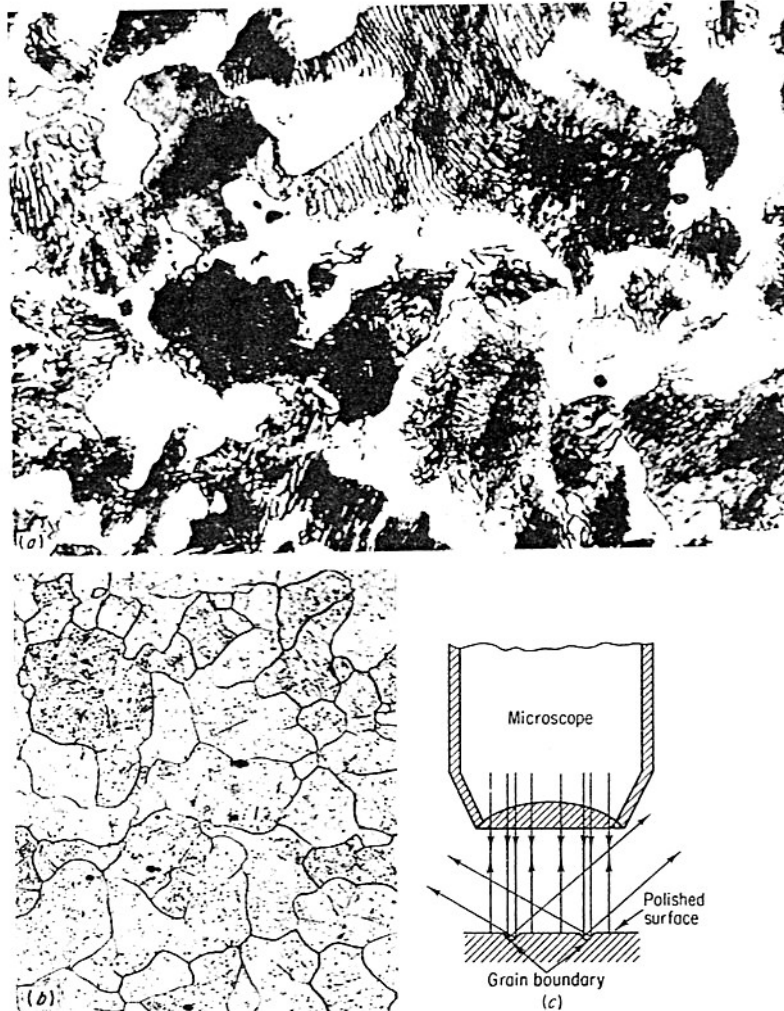
Waktu yang dihabiskan dan suksesnya penggosokkan akhir sangat bergantung pada kehati-hatian selama langkah penggosokkan sebelumnya. Langkah akhir untuk menghasilkan permukaan yang bebas dari goresan dilakukan dengan menggunakan roda berputar yang basah yang ditutup dengan kain khusus dan diisi secara hati-hati dengan partikel abrasif/amplas. Banyak jenis abrasif yang tersedia untuk penggosokkan akhir ini. Pemilihan kain penggosok tergantung pada material yang digosok dan tujuan pengamatan metalografi. Sampel yang digosok dengan benar akan memperlihatkan hanya inklusi bahan non-logam dan bebas dari goresan.

Pengetsaan

Tujuan dari pengetsaan adalah untuk membuat karakteristik struktur logam atau paduan terlihat jelas. Proses yang dilakukan harus bisa memperlihatkan perbedaan dari mikrostruktur-mikrostruktur yang ada. Proses ini dilakukan dengan menggunakan *reagent* yang tepat yang akan bereaksi secara kimia dengan permukaan yang telah digosok.

Jika paduan mempunyai fase dua atau lebih, komponen akan terlihat perbedaannya karena proses etsa akan menyerang satu atau lebih fase yang disukainya karena adanya perbedaan komposisi kimia fase-fase yang ada. (Gambar 1.11a). Pada paduan fase tunggal yang seragam atau pada logam murni, kecerahan akan terlihat nyata pada batas butir karena perbedaan laju etsa yang menyerang butir (Gambar 1.11b). Perbedaan laju serang ini terutama disebabkan oleh sudut dari bidang butir terhadap permukaan sampel yang dietsa. Karena serangan kimia etsa, batas butir akan muncul

sebagai lembah di permukaan yang digosok tersebut. Cahaya dari mikroskop yang menabrak sisi lembah ini akan dipantulkan keluar mikroskop, sehingga membuat batas butir terlihat lebih gelap.



Gambar 1.11. (a) Fotomikrograph campuran yang dihasilkan oleh pengetsaan. (b) Fotomikrograph besi murni. (c) Ilustrasi skema penampakan mikroskopik batas butir sebagai garis-garis hitam.

Pemilihan *reagent* etsa ditentukan oleh jenis logam atau paduan dan struktur yang ingin diperlihatkan. Tabel 1.3 memperlihatkan jenis-jenis *reagent* yang umum.

TABLE 1-3 Etching Reagents for Microscopic Examination*

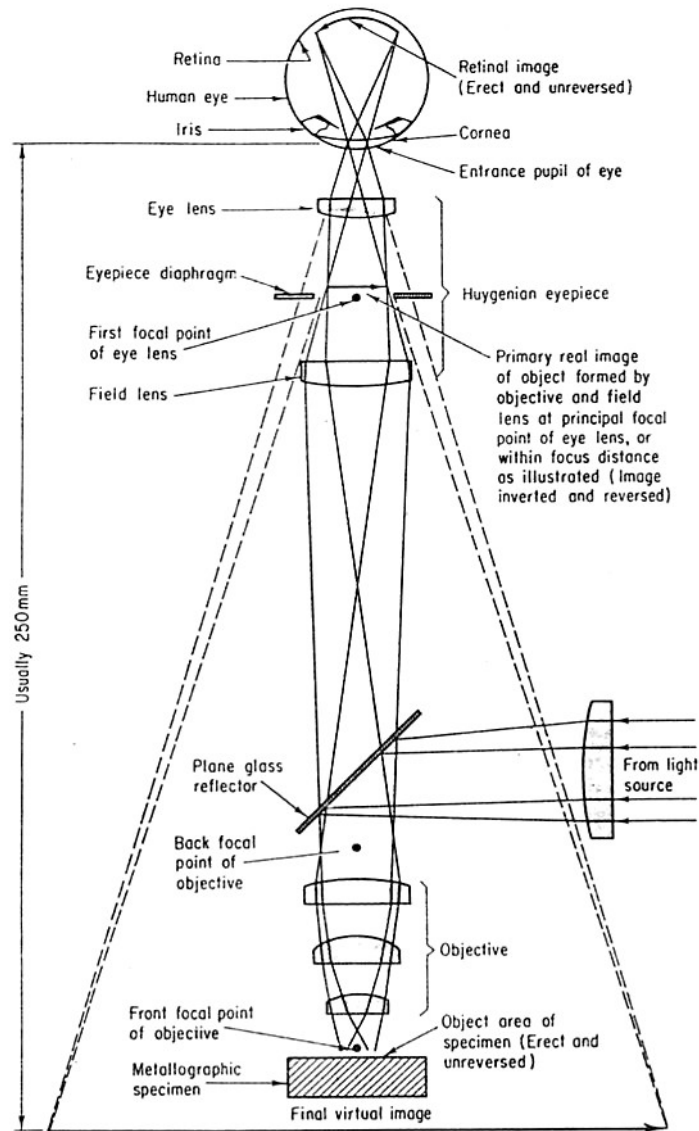
ETCHING REAGENT	COMPOSITION	USES	REMARKS
Nitric acid (nital)	White nitric acid 1-5 ml Ethyl or methyl alcohol (95% or absolute) 100 ml (also amyl alcohol)	In carbon steels: (1) to darken pearlite and give contrast between pearlite colonies, (2) to reveal ferrite boundaries, (3) to differentiate ferrite from martensite	Etching rate is increased, selectivity decreased, with increasing percentages of HNO ₃ . Reagent 2 (picric acid) usually superior Etching time a few seconds to 1 min
Picric acid (picral)	Picric acid 4 g Ethyl or methyl alcohol (95% or absolute) 100 ml	For all grades of carbon steels: annealed, normalized, quenched, and tempered, spheroidized, austempered. For all low-alloy steels attacked by this reagent	More dilute solutions occasionally useful. Does not reveal ferrite grain boundaries as readily as nital Etching time a few seconds to 1 min or more
Ferric chloride and hydrochloric acid	Ferric chloride 5 g Hydrochloric acid 50 ml Water 100 ml	Structure of austenitic nickel and stainless steels	
Ammonium hydroxide and hydrogen peroxide	Ammonium hydroxide 5 parts Water 5 parts Hydrogen peroxide 2-5 parts	Generally used for copper and many of its alloys	Peroxide content varies directly with copper content of alloy to be etched Immersion or swabbing for about 1 min. Fresh peroxide for good results
Ammonium persulfate	Ammonium persulfate 10 g Water 90 ml	Copper, brass, bronze, nickel silver, aluminum bronze	Use either cold or boiling; immersion
Palmerton reagent	Chromic oxide 200 g Sodium sulfate 15 g Water 1,000 ml	General reagent for zinc and its alloys	Immersion with gentle agitation
Ammonium molybdate	Molybdic acid (85%) 100 g Ammonium hydroxide (sp gr 0.9) 140 ml Water 240 ml Filter and add to nitric acid (sp gr 1.32) 60 ml	Rapid etch for lead and its alloys; very suitable for removing thick layer of worked metal	Alternately swab specimen and wash in running water
Hydrofluoric acid	Hydrofluoric acid (conc) 0.5 ml H ₂ O 99.5 ml	General microscopic for aluminum and its alloys	Swab with soft cotton for 15 s

* From "Metals Handbook," 1948 ed., American Society for Metals, Metals Park, Ohio.

Mikroskop Metalurgi

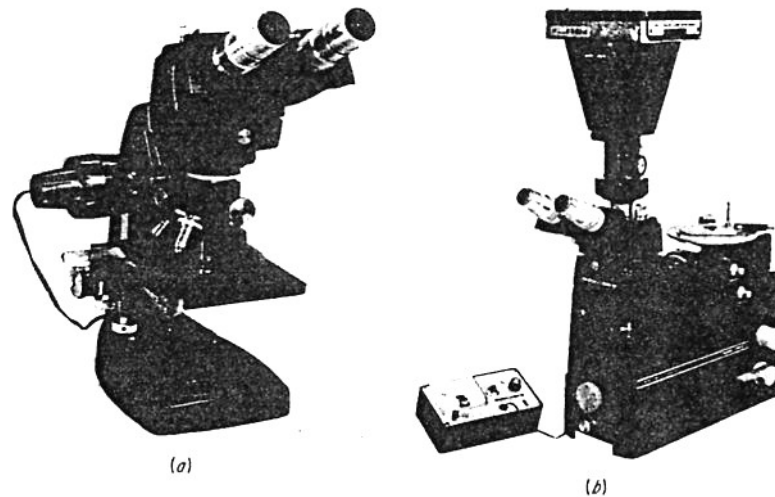
Mikroskop metalurgi mempunyai perbedaan dengan mikroskop biologi dalam bagaimana spesimen diberi cahaya. Karena sampel logam adalah *opak* (tak tembus cahaya), sampel mesti diterangi oleh cahaya pantul. Seperti terlihat pada Gambar 1.12, pancaran cahaya horizontal dari sumber cahaya dipantulkan oleh reflektor gelas datar (*plane-glass reflector*), terus kebawah melewati pengarah mikroskop (microscope objective) ke permukaan spesimen. Sebagian cahaya datang ini dipantulkan dari permukaan spesimen dan diperkuat ketika melewati sistem lensa yang lebih rendah, *objective* dan terus naik keatas melalui reflektor gelas datar dan diperkuat lagi oleh lensa bagian atas (lubang intip). Gambar 1.13a memperlihatkan mikroskop metalurgi jenis meja.

Adalah mungkin memasang kamera diatas lubang intip. Gambar 1.13b adalah mikroskop jenis bangku yang didesain untuk pengamatan visual atau perekaman permanen struktur metalografi dengan metode fotografi dan akan memberikan hasil foto yang baik.



Gambar 1.12. Ilustrasi prinsip mikroskop metalurgi dan jejak sinar melalui sistem optik dari medan objek ke citra akhir.

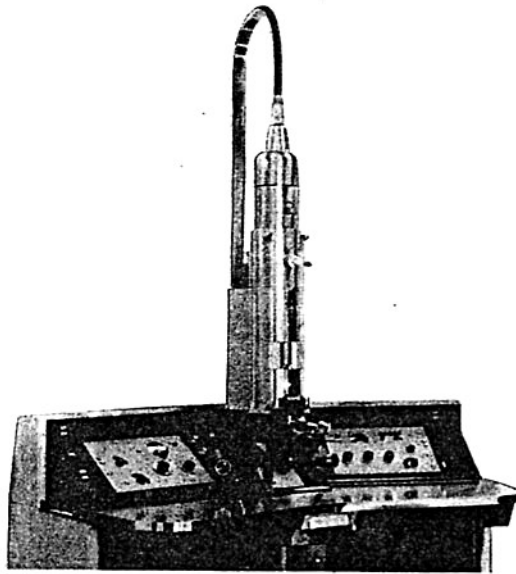
Maksimum penguatan dari mikroskop optik kira-kira 2000X. Keterbatasan penguatan adalah karena panjang gelombang cahaya tampak, yang akan membatasi resolusi detil spesimen. Mikroskop elektron bisa memberikan penguatan yang lebih besar dari mikroskop optik karena elektron yang bergerak dengan kecepatan tinggi akan berlaku seperti gelombang dan memiliki panjang gelombang 100.000X lebih kecil dari panjang gelombang cahaya tampak. Mikroskop elektron ditunjukkan oleh gambar 1.14a.



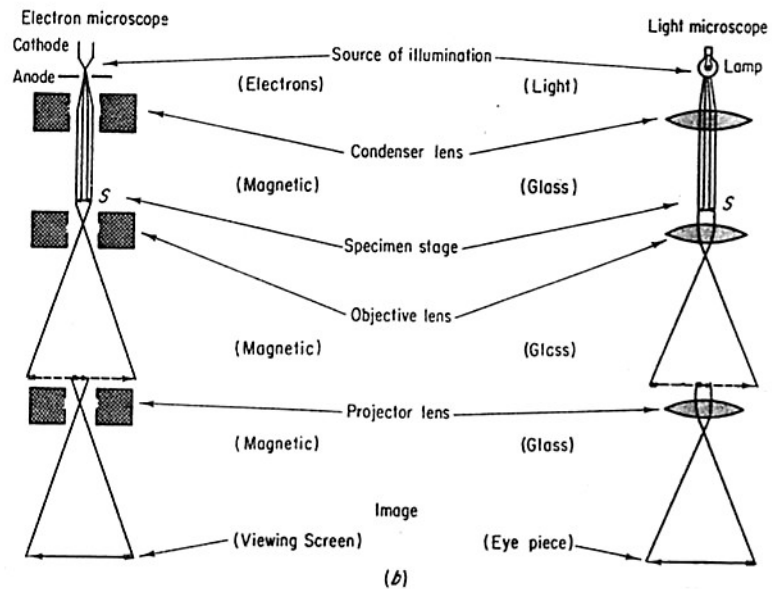
Gambar 1.13. (a) Mikroskop metalurgi. (b) Metalografi jenis meja.

Karena spesimen logam adalah opak bagi pancaran elektron, perlu disiapkan dengan teknik khusus replika tipis dari permukaan spesimen yang diperiksa. Spesimen digosok dan dietsa seperti persiapan metalografi normal. Kemudian spesimen diletakkan pada pelat panas dengan pellet kecil dari plastik pada permukaan yang dietsa. Ketika temperatur naik, plastik mulai mengalir dan tekanan diberikan supaya terjadi kontak antara plastik dengan permukaan spesimen. Setelah dingin, replika dengan hati-hati dilepas. Untuk meningkatkan kecerahan, lapisan tipis karbon atau *tungsten* diuapkan keatas replika pada sudut tertentu dari satu sisinya.

Pada mikroskop elektron, elektron dipancarkan pada replika dengan lensa *condensing*. Tergantung dari tebal dan kerapatan replika, sebagian elektron akan diserap dan dipantulkan dan sebagian lain menembus replika. Medan magnet pada lensa pengarah akan memfokuskan dan memperbesar pancaran elektron yang menembus replika. Elektron ini akan difokuskan ke layar oleh lensa proyektor. Mikroskop elektron yang ditunjukkan gambar 1.14a mempunyai jangkauan pembesaran dari 1400 hingga 32000X, yang masih bisa ditingkatkan menjadi 200.000X dengan lensa tambahan.



(a)



(b)

Fig. 1-14 (a) The electron microscope. (b) Similarity of light and electron microscopes. (Radio Corporation of America.)

Gambar 1.14. (a) Mikroskop elektron. (b) Kemiripan cahaya dan mikroskop elektron.

Soal-soal

1. Jelaskan hubungan antara warna-warna yang terlihat pada logam dengan temperaturnya.
2. Coba anda jelaskan prinsip kerja dari termometer ekspansi logam.
3. Coba anda jelaskan prinsip kerja dari termometer ekspansi cairan.
4. Jelaskan bagaimana sebuah termokopel dikalibrasi.
5. Jelaskan prinsip kerja dari termometer tahanan, dan sebutkan jangkauan kerjanya.
6. Jelaskan prinsip kerja dari pyrometer termoelektrik.
7. Sebutkan material-material yang umumnya digunakan untuk termokopel.
8. Faktor apa yang dapat menyebabkan kesalahan dalam sirkuit termoelektrik.
9. Disamping dapat mengukur temperatur tinggi, apa keuntungan lainnya dari pirometer optik?
10. Sebutkan prosedur mengenai persiapan sampel yang akan dilakukan uji metalografi.

BAB II

PENGUJIAN-PENGUJIAN PADA MATERIAL

Kekerasan

Sifat “kekerasan” sulit untuk didefinisikan kecuali dalam hubungan dengan uji tertentu yang digunakan untuk menentukan harganya. Harap diperhatikan bahwa angka kekerasan tidak bisa digunakan langsung di dalam desain seperti harga kekuatan tarik, karena kekerasan tidak mempunyai arti intrinsik.

Kekerasan bukanlah sifat dasar material tetapi berkaitan dengan sifat elastis dan plastis bahan. Harga kekerasan yang diperoleh dari uji tertentu berlaku hanya sebagai perbandingan antar material dan perlakuan. Uji kekerasan banyak digunakan untuk inspeksi dan kontrol. Perlakuan dan pengerjaan panas biasanya merubah kekerasan.

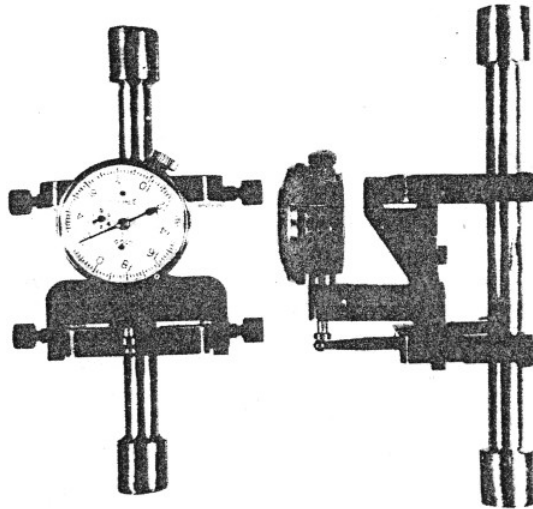
Berbagai uji kekerasan sudah dijelaskan pada perkuliahan “material teknik”.

Uji Tarik

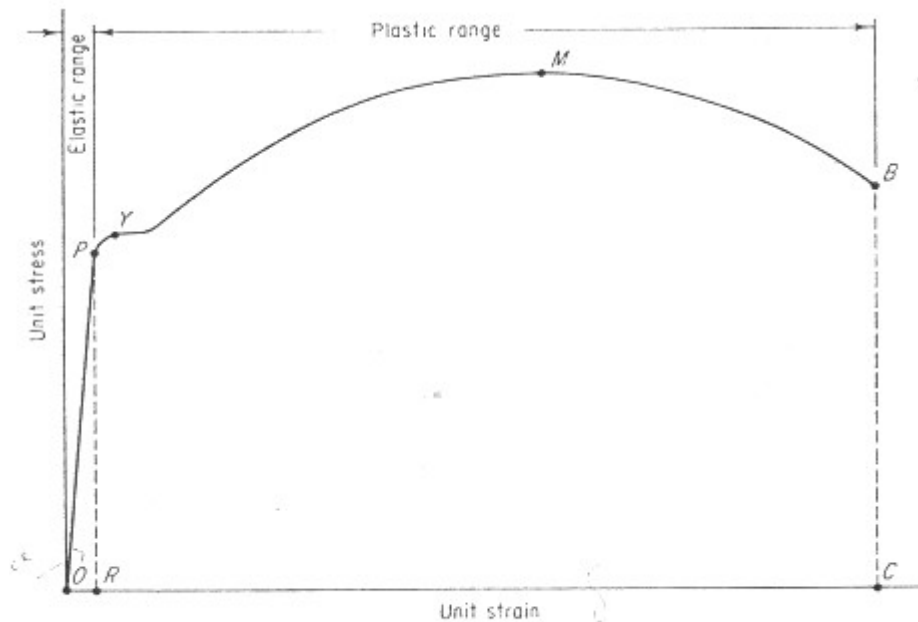
Uji tarik banyak dilakukan untuk menentukan sifat-sifat mekanik tertentu. Sampel yang telah disiapkan ditempatkan pada *head* dari mesin uji dan beban aksial diberikan pada sampel melalui sistem pembebanan mekanik atau hidrolik. Gaya ditunjukkan oleh jarum penunjuk. Jika luas penampang melintang awal spesimen diketahui, tegangan yang dihasilkan bisa dihitung. Deformasi atau regangan diukur pada panjang tetap, biasanya 2 inci, oleh gage pengukur yang disebut *extensometer* (gambar 2.1). Pada beberapa kasus, gage regangan listrik bisa digunakan untuk mengukur regangan total.

Hubungan antara tegangan – regangan, didapatkan secara eksperimen, dan ditunjukkan oleh grafik tegangan-regangan pada gambar 2.2 untuk material ulet dan gambar 2.3 untuk material getas.

Penjelasan lebih lanjut tentang uji tarik dan sifat-sifat mekanik yang berkaitan, telah dipelajari pada perkuliahan “material teknik”.



Gambar 2.1. Contoh tarikan dengan ekstensometer.



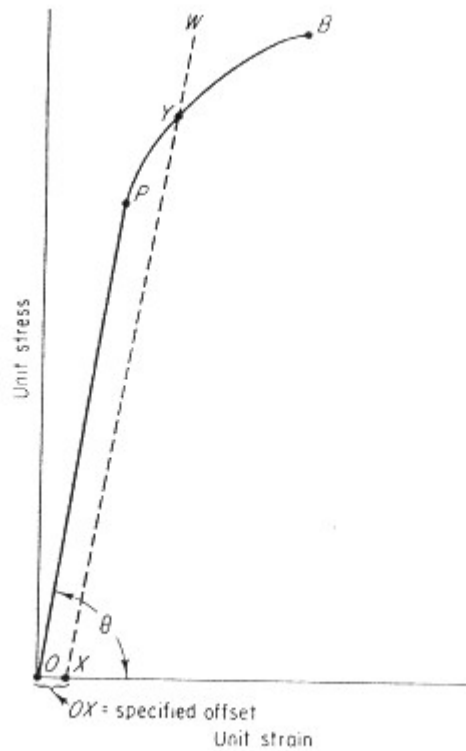
Gambar 2.2. Diagram tegangan-regangan untuk baja ulet.

Uji Impak

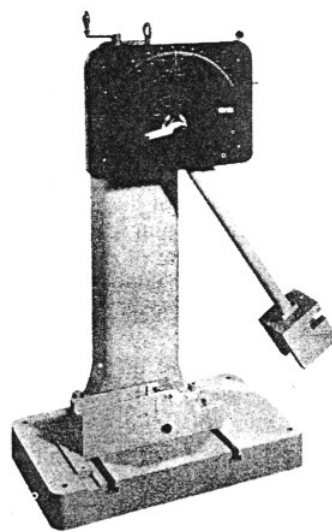
Walaupun ketangguhan material bisa diperoleh dari daerah dibawah diagram tegangan-regangan, uji impak akan memberikan indikasi ketangguhan relatif.

Mesin uji impak biasa bisa dilihat pada gambar 2.4, dimana mesin mempunyai pendulum berayun dengan berat tetap yang diangkat ke ketinggian standar dari spesimen yang diuji. Pada ketinggian ini, pendulum mempunyai sejumlah energi potensial, dan ketika pendulum dilepaskan, energi ini dirobah menjadi energi kinetik

sampai menumbuk spesimen. Sebagian energi pendulum akan digunakan untuk mematahkan spesimen sehingga pendulum akan naik dengan ketinggian yang lebih rendah dari ketinggian awal. Berat pendulum dikalikan dengan perbedaan ketinggian menunjukkan energi yang diserap spesimen.



Gambar 2.3. Diagram tegangan-regangan bahan rapuh.



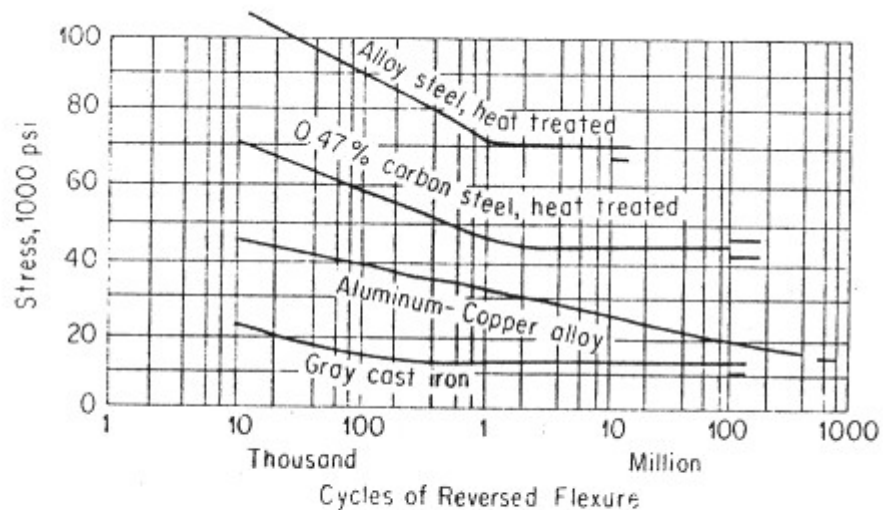
Gambar 2.4. Mesin uji impak.

Uji Fatigue

Uji fatigue adalah jenis uji dinamik yang mencari sifat relatif material jika mengalami beban yang berulang atau berfluktuasi. Uji ini berusaha mensimulasikan kondisi tegangan yang dialami komponen mesin dengan beban getaran atau siklus/berulang. Besar tegangan bisa dirobah-robah oleh mesin, dan jenis tegangan (tarik, tekan, lentur atau torsi) ditentukan oleh mesin dan oleh jenis spesimen yang diuji. Tegangan yang diberikan kepada spesimen selama pengetesan secara kontinyu berubah diantara dua harga, dan harga maksimumnya biasanya lebih rendah dari kekuatan luluh material. Beban tegangan diberikan sampai spesimen patah/rusak atau jumlah siklus telah dicapai.

Hasil pengujian digambarkan dalam bentuk grafik dengan sumbu vertikal sebagai Tegangan (S) dan sumbu horisontal sebagai jumlah siklus (N). "Batas ketahanan" (endurance limit) material didefinisikan sebagai tegangan batas dimana dibawah tegangan ini material akan tahan tanpa patah pada siklus tegangan yang besar.

Uji fatigue banyak digunakan untuk mempelajari sifat material tidak hanya untuk jenis dan jangkauan beban yang berfluktuasi tetapi juga untuk : efek korosi, kondisi permukaan, temperatur, ukuran dan konsentrasi tegangan.



Gambar 2.5. Diagram S-N (Stress-Siklus).

Uji Mulur/Creep

Uji mulur adalah mencari perubahan yang terus menerus dalam deformasi material pada suhu tinggi jika tegangan berada dibawah kekuatan luluh. Hasilnya sangat diperlukan di dalam mendesain komponen mesin yang bekerja pada suhu tinggi.

UJI TIDAK MERUSAK / NON DESTRUCTIVE TESTING

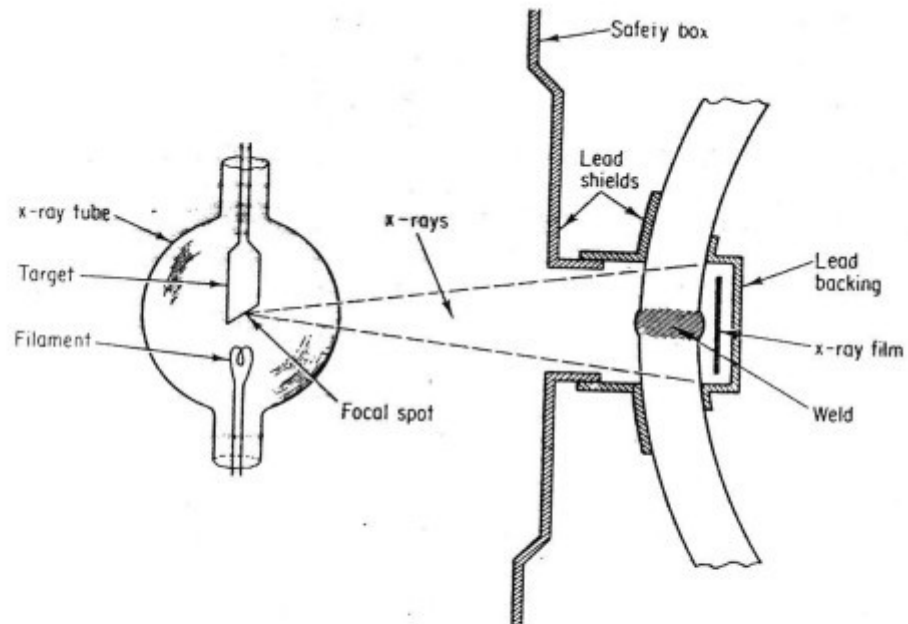
Uji tidak merusak adalah sebuah pengujian sebuah objek dengan cara apapun yang tidak mengganggu/merusak benda didalam penggunaannya setelah itu. Pengujian tidak merusak digunakan untuk membuat suatu produk/komponen handal, aman dan ekonomis.

5 metode yang umum dalam pengujian tidak merusak:

1. Radiografi.
2. Magnetic-particle inspection.
3. Fluorescent-penetrant inspection.
4. Ultrasonic inpection.
5. Eddy current inspection.

Radiografi Logam

Radiografi logam bisa dilakukan dengan menggunakan sinar-X atau sinar gamma yaitu sinar elektromagnetik gelombang pendek yang sanggup menembus ketebalan logam. Sinar gamma bisa dihasilkan oleh bahan radio aktif alam seperti *radium* atau isotop radio aktif seperti *cobalt-60*. Sinar gamma lebih bisa menembus daripada sinar-X, namun mempunyai kekurangan kepekaan didalam pemakaiannya. Sinar-X diperoleh jika materi di tembak dengan aliran elektron yang cepat. Ketika elektron tiba-tiba dihentikan oleh materi, sebagian dari energi kinetiknya dirubah ke energi radiasi atau sinar-X. Gambar 2.6 menunjukkan penggunaan sinar-X untuk pengujian pelat lasan. Sinar-X adalah berbahaya sehingga perlu digunakan alat pengaman untuk melindungi pemakai.

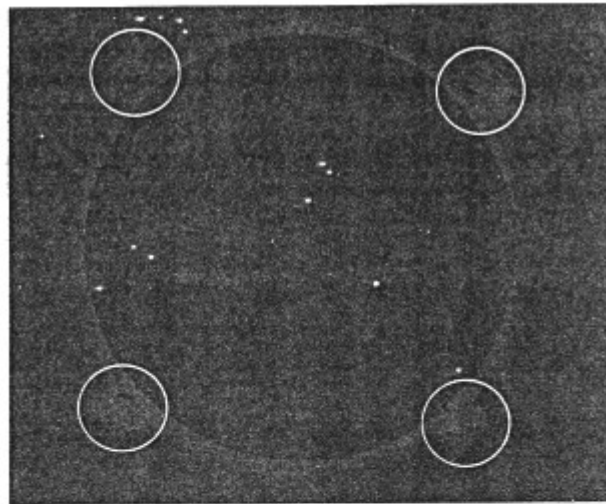


Gambar 2.6. Skema penggunaan sinar-x untuk pengujian pelat lasan.

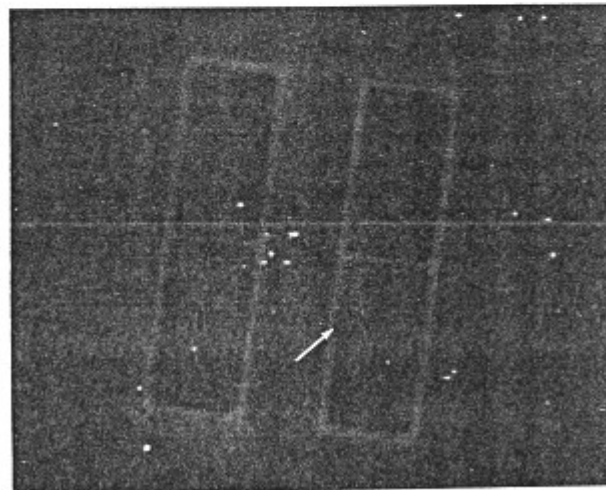
Radiograf adalah gambar bayangan material yang transparan oleh radiasi. Sinar-X menggelapkan film sehingga daerah dengan kerapatan lebih rendah akan terlihat lebih gelap pada negatif film daripada daerah dengan kerapatan tinggi. Sehingga lobang atau retak muncul sebagai daerah yang lebih gelap, sedangkan inklusi tembaga pada paduan aluminium muncul lebih terang (lihat gambar 2.7).

Radiografi disamping banyak digunakan untuk inspeksi produk cor dan lasan, dipakai juga untuk mengukur ketebalan material. Gambar 2.8 memperlihatkan pengukur ketebalan radiasi sederhana.

Radiasi dari sumber dipengaruhi oleh material yang diuji. Ketika ketebalan meningkat, intensitas radiasi yang mencapai detektor menurun. Jika respons detektor dikalibrasi terhadap ketebalan yang diketahui, bacaan pada detektor bisa digunakan untuk menunjukkan ketebalan material yang diinspeksi.

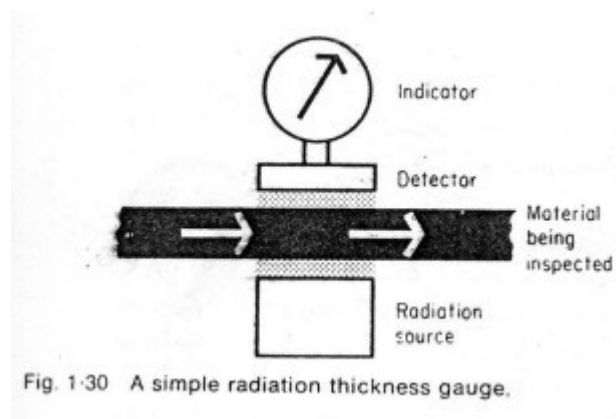


(a)



(b)

Gambar 2.7. (a) Radiografi coran baja tahan karat. Titik hitam merupakan daerah kosong karena penyusutan (b) Radiografi coran perunggu. Titik-titik hitam menunjukkan porositas.



Gambar 2.8. Sebuah pengukur ketebalan radiasi.

Magnetic-particle Inspection (Magnaflux)

Ini merupakan metode untuk mendeteksi adanya retak, tindihan, robek, *seam*, inklusi dan diskontinuitas sejenis pada material feromagnetik seperti besi dan baja. Metode ini akan mendeteksi diskontinuitas permukaan halus yang tak terdeteksi oleh mata telanjang dan juga mendeteksi diskontinuitas yang terletak sedikit dibawah permukaan. Metode ini tidak bisa dipakai pada material nonmagnetik.

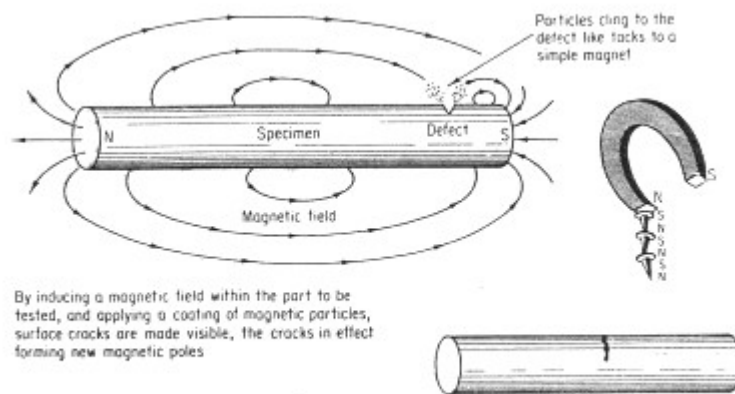
Inspeksi Partikel Magnetik bisa dilakukan dengan berbagai cara. Potongan yang diinspeksi bisa dibuat magnet dan kemudian ditutupin dengan partikel magnet halus (bubuk besi). Metode ini disebut *metode residual*. Atau pemagnetan dan pemberian partikel dilakukan secara simultan, metode ini disebut *metode kontinyu*. Partikel magnetik bisa berbentuk suspensi didalam cairan dan kemudian dilapiskan ke potongan benda yang diukur atau potongan benda tersebut dicelupkan ke suspensi. Metode ini disebut *metode basah*. Dalam beberapa penerapan, partikel yang berbentuk bubuk halus disemprotkan ke permukaan potongan benda yang diuji, metode ini disebut *metode kering*.

Adanya diskontinuitas ditunjukkan oleh formasi pola partikel pada permukaan. Pola disebut *indikasi* dan menunjukkan bentuk proyeksi permukaan diskontinuitas. *Metode Magnaglo* yang dikembangkan oleh perusahaan Magnaflux adalah variasi dari pengujian Magnaflux. Disini suspensi yang dialirkan pada benda kerja yang bermagnet mengandung partikel magnet *fluorescens*. Benda kerja kemudian dilihat dibawah cahaya hitam, yang membuat *indikasi* terlihat lebih jelas.

Ketika diskontinuitas ada di permukaan, medan magnet akan bocor ke permukaan dan membentuk kutub utara dan selatan kecil yang akan menarik partikel magnet (lihat Gambar 2.9). Jika diskontinuitas halus ada dibawah permukaan, sebagian medan magnet mungkin masih direfleksikan ke permukaan namun kebocorannya lebih kecil dan lebih sedikit partikel yang tertarik, sehingga *indikasi* yang didapat lebih lemah. Jika diskontinuitas jauh dibawah permukaan, tidak ada kebocoran medan yang didapatkan sehingga tidak ada penunjukkan *indikasi*.

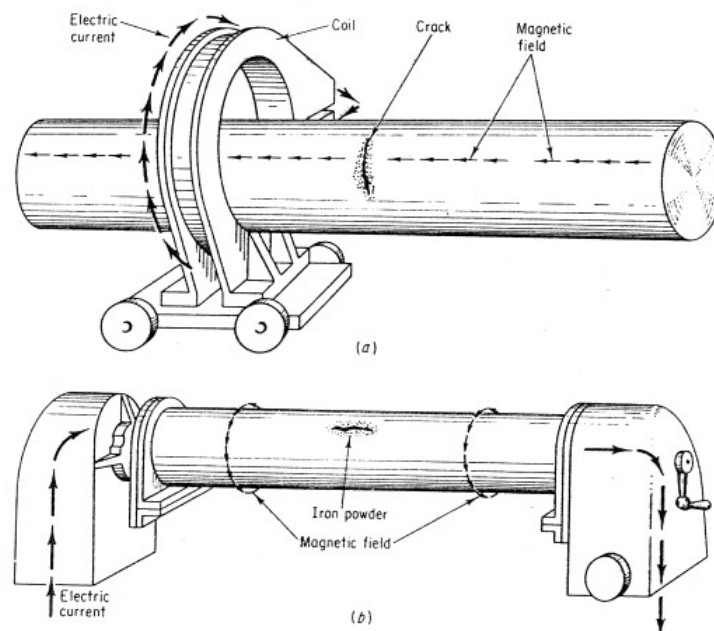
Medan magnetik yang diberikan harus tegak lurus terhadap diskontinuitas. Seperti terlihat pada gambar 1.32, untuk pemagnetan longitudinal, medan magnet dihasilkan pada arah paralel dengan sumbu panjang benda kerja dengan cara meletakkan benda didalam koil yang dieksitasi oleh arus listrik sehingga sumbu benda paralel dengan sumbu koil. Benda logam kemudian menjadi inti elektromagnet dan menjadi magnet karena induksi dari medan magnet yang ditimbulkan koil. Benda yang sangat panjang dibuat magnet dengan cara menggerakkan koil sepanjang panjang benda. Untuk

pemagnetan melingkar yang juga ditunjukkan oleh gambar 2.10, medan magnet tegak lurus terhadap sumbu benda dan diperoleh dengan memasukkan arus magnet ke benda disepanjang sumbu benda.

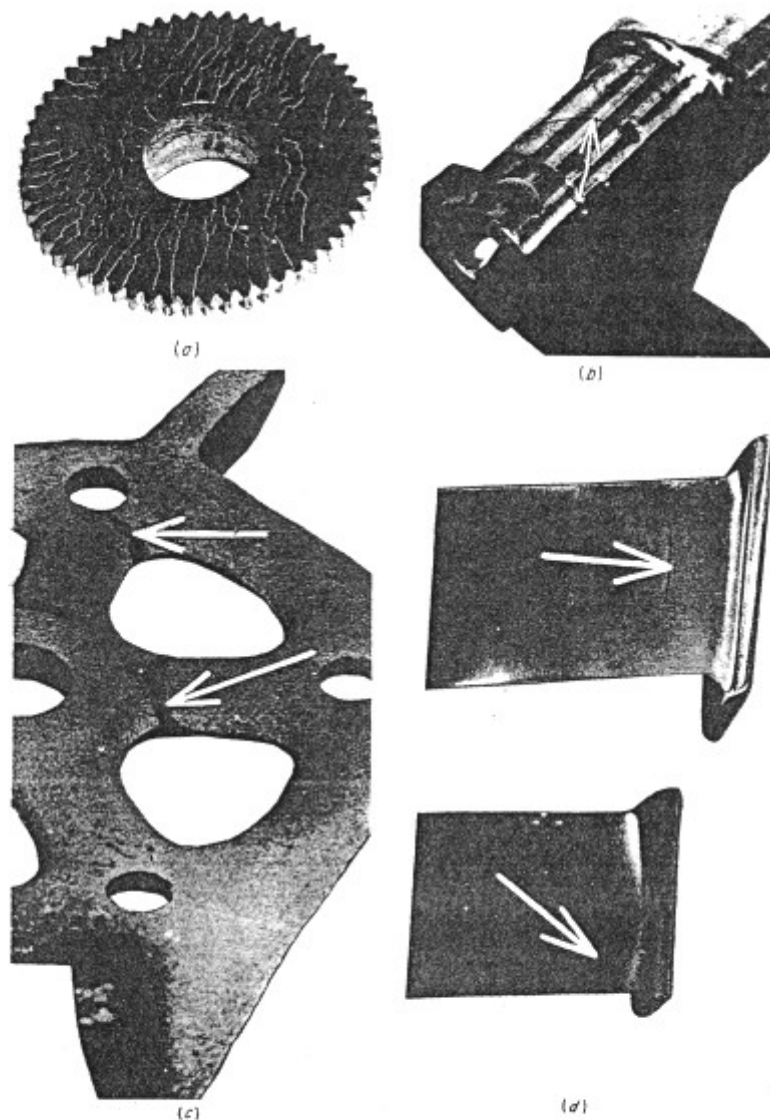


Gambar 2.9. Prinsip Uji Magnafluks.

Kepekaan inspeksi partikel magnetik dipengaruhi oleh banyak faktor termasuk kekuatan suspensi, waktu persinggungan dengan suspensi, waktu pembentukan *indikasi*, dan kekuatan arus magnetik. Beberapa contoh retak yang dihasilkan dari pemeriksaan Magnaflux atau Magnaglo ditunjukkan oleh gambar 2.11.



Gambar 2.10. Ilustrasi dua jenis magnetisasi: (a) Magnetisasi longitudinal; (b) magnetisasi melingkar.



Gambar 2.11. Cacat yang biasa terjadi dari hasil Magnafluks dan Magnaflo. (a) Retak Penggerindaan; (b) Retak fatigue; (c) Retak pengecoran.

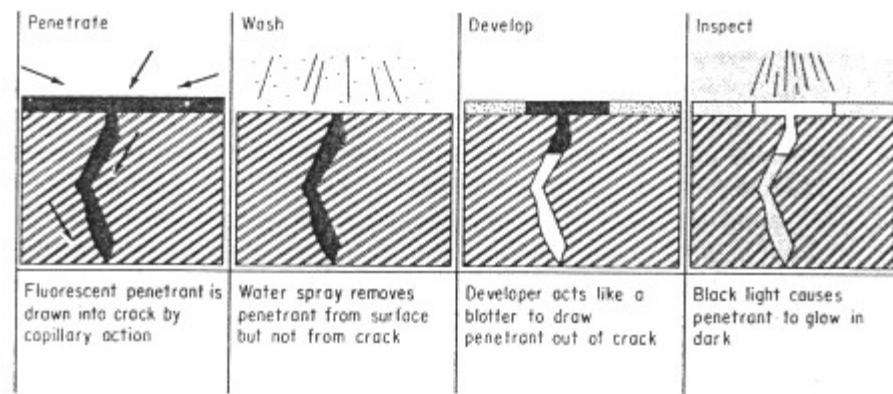
Fluorescent-penetrant Inspection (Zyglo)

Ini merupakan metode pengujian tidak merusak sensitif yang mendeteksi diskontinuitas sesaat seperti retak, kerut dan porositas pada permukaan. Metode ini bisa dilakukan pada material magnetik ataupun material nonmagnetik namun kegunaan utamanya adalah material nonmagnetik. Teknik penetrant bisa digunakan untuk menginspeksi material homogen yang tidak berongga seperti logam, gelas, plastik dan beberapa material keramik.

Komponen yang diuji pertama-tama diberi perlakuan dengan *penetrant*. Penetrant diberikan dengan cara pencelupan, penyemprotan atau penyikatan atau cara lainnya.

Cairan penetrant akan ditarik ke dalam retak atau diskontinuitas lainnya oleh gaya kapiler. Setelah itu penetrant yang tersisa di permukaan dibersihkan. Benda uji kemudian diberikan perlakuan dengan bubuk kering atau suspensi bubuk didalam cairan. Bubuk ini atau *developer* akan menarik penetrant dari cacat dan memperbesar daerah *indikasi* penetrant. Penetrant harus dengan mudah bisa diobservasi pada bubuk pengembang (*developer*). Salah satu cara adalah menggunakan warna yang kontras antara penetrant dan *developer*. Umumnya warna yang digunakan adalah putih untuk *developer* dan merah untuk penetrant.

Metode yang lain adalah menggunakan penetrant bercahaya/fluoresens. Langkah-langkah inspeksinya ditunjukkan oleh gambar 2.12. Dalam hal ini penetrant mengandung material yang memancarkan cahaya tampak jika diberi cahaya ultraviolet. Lampu yang menghasilkan cahaya ultraviolet disebut juga lampu hitam.



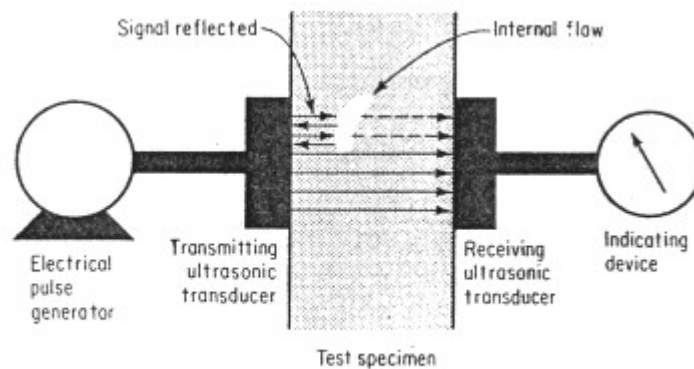
Gambar 2.12. Langkah utama dalam pengujian fluerescent-penetrant.

Inspeksi Ultrasonik

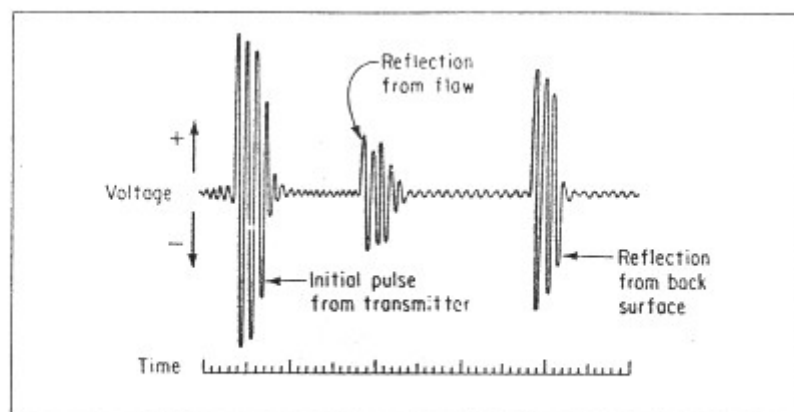
Penggunaan gelombang suara untuk mencari cacat merupakan metode yang sudah lama dilakukan. Jika sepotong logam dipukul dengan palu, ia akan menghasilkan suara tertentu, dimana irama dan redamannya dipengaruhi oleh adanya cacat internal. Namun teknik pemukulan dan mendengarkan bunyi ini hanya dilakukan untuk cacat yang besar.

Metode yang lebih dikembangkan adalah dengan menggunakan gelombang suara diatas jangkauan audio yaitu pada frekwensi 1 hingga 5 juta Hz atau disebut juga *ultrasonik*. Gelombang ultrasonik mempunyai sifat cepat, handal untuk pengujian tidak merusak dan dihasilkan dari peralatan elektronik yang akan menembus logam, cairan dan banyak material lainnya pada kecepatan beberapa ribu kaki per detik. Gelombang ultrasonik untuk pengujian tidak merusak biasanya dihasilkan oleh material *piezoelektrik*.

Dua metode pengujian ultrasonik umum adalah *transmisi-tembus* dan metode *pulsa-echo* dan ditunjukkan oleh gambar 2.13. Metode transmisi tembus menggunakan sebuah transduser ultrasonik pada setiap sisi objek yang diuji. Jika pulsa listrik pada frekwensi yang sudah diketahui diberikan ke kristal pemancar, gelombang ultrasonik akan dibangkitkan dan akan menembus spesimen ke sisi lainnya. Transduser penerima pada sisi yang berlawanan akan menerima getaran dan akan merobahnya ke sinyal listrik dan dikuatkan dan kemudian ditampilkan di monitor osiloskop, sebuah meter atau indikator lainnya. Jika gelombang ultrasonik berjalan menembus spesimen tanpa menemukan cacat, sinyal yang diterima relatif besar, jika ada cacat pada jalur rambat gelombang ultrasonik, sebagian energi akan dipantulkan dan sinyal sinyal yang diterima oleh transduser penerima akan berkurang.



Gambar 2.13. Metode transmisi langsung dan pulsa-echo pada pengujian ultrasonik.



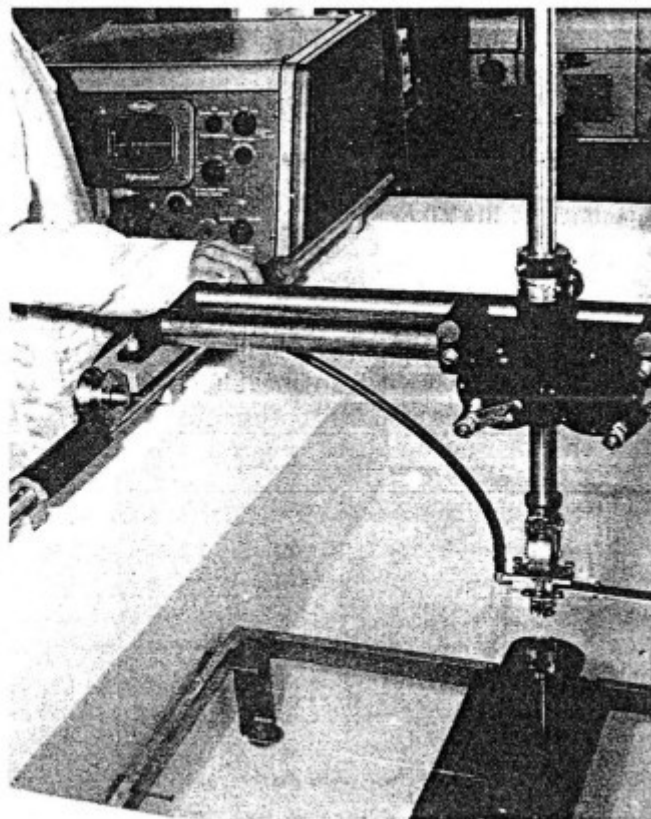
Gambar 2.14. Pola osiloskop pulsa-echo gema.

Metode pulsa-echo hanya menggunakan satu transduser yang berfungsi sebagai pemancar dan penerima. Pola osiloskop untuk metode pulsa-echo akan serupa dengan

gambar 2.14. Ketika gelombang suara memasuki material yang diuji, sebagian akan dipantulkan kembali ke kristal dimana akan dirubah menjadi impuls listrik. Impuls ini diperkuat dan dirobah menjadi suatu indikasi pada layar osiloskop. Ketika gelombang suara mencapai sisi lain material, ia akan dipantulkan kembali dan akan menghasilkan indikasi yang lain di layar osiloskop pada suatu jarak di kanan indikasi pertama. Jika ada cacat antara permukaan depan dan permukaan belakang material, akan muncul indikasi ketiga pada layar diantara dua indikasi permukaan depan dan belakang. Karena indikasi-indikasi pada layar osiloskop mengukur waktu antara pantulan pulsa dari permukaan depan dan belakang, maka jarak indikasi adalah merupakan ketebalan material. Oleh sebab itu lokasi cacat bisa ditentukan secara akurat dari indikasi yang terlihat pada layar.

Untuk pengujian benda besar, lapisan tipis minyak akan membuat kontak transduser dengan benda uji lebih baik. Untuk benda kecil, benda bisa dicelupkan pada tangki berisi air, minyak atau gliserin. Transduser akan memancarkan gelombang suara menembus medium dan benda yang diuji (gambar 2.15).

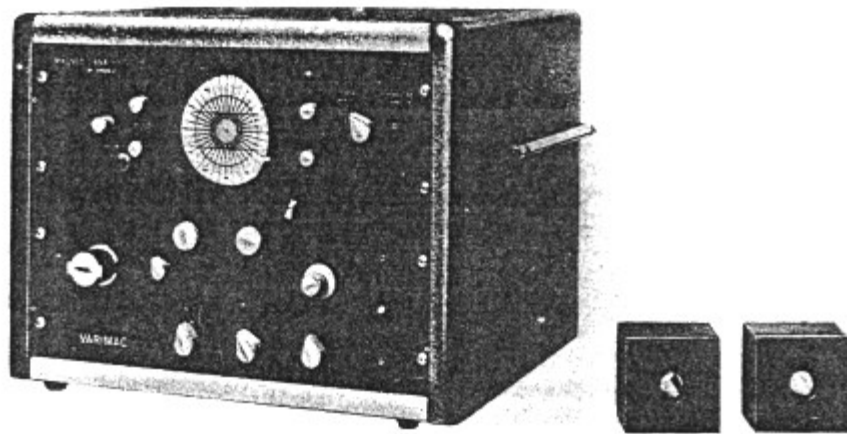
Inpeksi ultrasonik digunakan untuk mendeteksi dan mencari lokasi cacat seperti rongga pengkerutan, retak internal, porositas dan inklusi dari bahan non logam besar.



Gambar 2.15. Pengujian ultrasonik dengan perendaman dalam air.

Inspeksi Arus Eddy (Eddy Current Inspection)

Teknik arus Eddy digunakan untuk menginspeksi material yang mengantarkan listrik terhadap adanya cacat, ketakteraturan struktur dan variasi pada komposisi. Pada pengujian arus Eddy, medan magnet yang bervariasi dihasilkan apabila sumber listrik AC diberikan ke koil. Jika medan magnet ini didekatkan ke benda uji yang bisa menghantarkan arus listrik, arus Eddy akan diinduksikan ke spesimen. Arus Eddy ini akan menghasilkan medan magnet pada benda uji tersebut. Unit pendeteksi akan mengukur medan magnetik ini dan merubahnya ke tegangan yang bisa dibaca pada meter atau layar monitor. Sifat-sifat seperti kekerasan, komposisi paduan, kemurnian kimia dan kondisi perlakuan panas yang mempengaruhi medan magnet bisa diukur secara langsung oleh koil tunggal.



Gambar 2.16. Alat uji arus eddy dan dua koil melingkar.

Soal-soal

1. Coba anda jelaskan prinsip kerja uji tarik.
2. Jelaskan tujuan dilakukannya uji impak dan jelaskan cara kerja alat uji impak.
3. Apa yang dimaksud dengan *fatigue* pada logam? Berikan contoh grafik S-N untuk sebuah baja.
4. Sebutkan pengujian-pengujian tidak merusak yang kamu ketahui.
5. Apakah batasan-batasan untuk inspeksi partikel magnetik?
6. Apakah batasan-batasan untuk inspeksi *fluorescent-penetrant*?
7. Dan apakah batasan-batasan untuk inspeksi ultrasonik.
8. Apakah yang dimaksud dengan *transducer*?
9. Sebutkan dan jelaskan 3 jenis *transducer*.
10. Pengujian tidak merusak manakah yang digunakan untuk mensortir batangan baja dari baja campuran.

BAB III

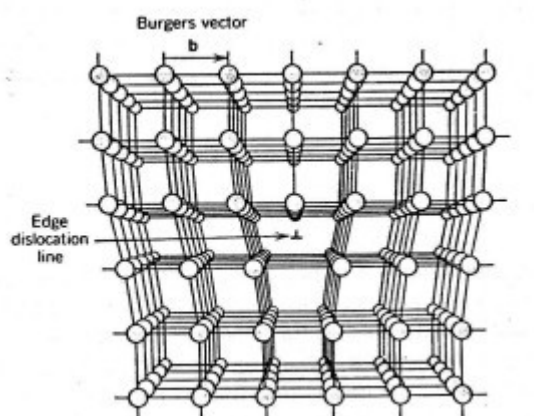
PERGERAKAN DISLOKASI DAN MEKANISME PENGUATAN

DISLOKASI DAN DEFORMASI PLASTIS

Dislokasi adalah cacat pada kristal karena atom-atom yang tersusun tidak segaris atau tidak tersusun dengan benar.

Jenis-jenis dislokasi :

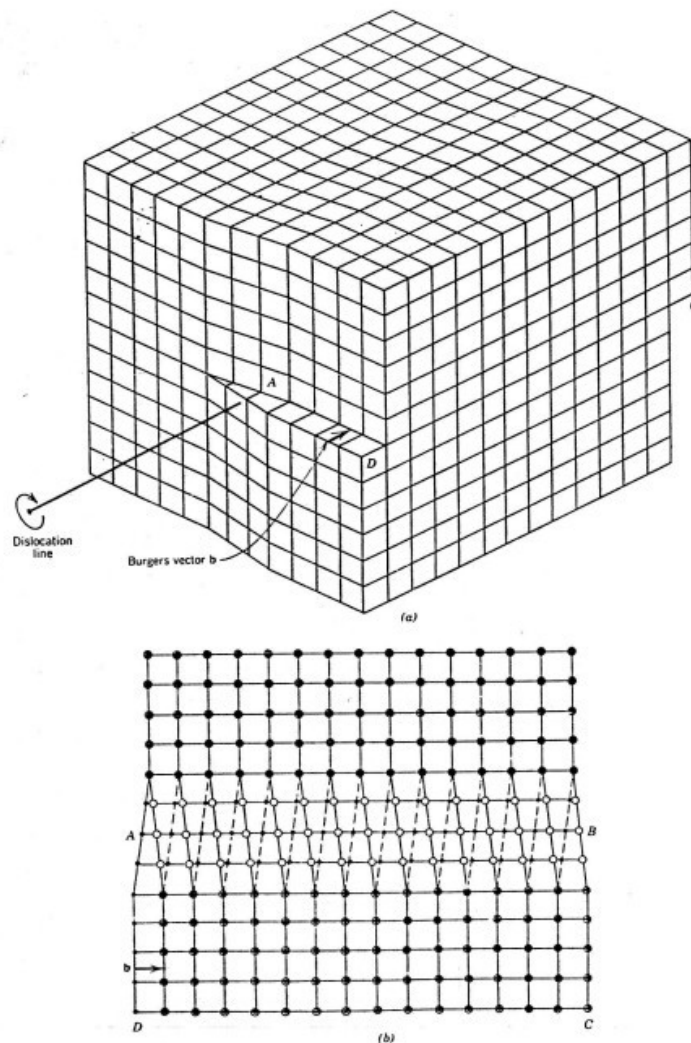
1. Dislokasi pinggir atau dislokasi garis.
 2. Dislokasi sekrup (screw) atau ulir.
 3. Dislokasi campuran.
- Dislokasi pinggir atau dislokasi garis :
dimana terdapat sebuah bidang atom extra atau setengah bidang atom, dan sisinya berakhir ditengah-tengah kristal. (Gambar.3.1). \perp "simbol :



Gambar 3.1. Posisi atom di sekeliling dan di sisi dislokasi; setengah bidang atom tambahan ditunjukkan oleh gambar.

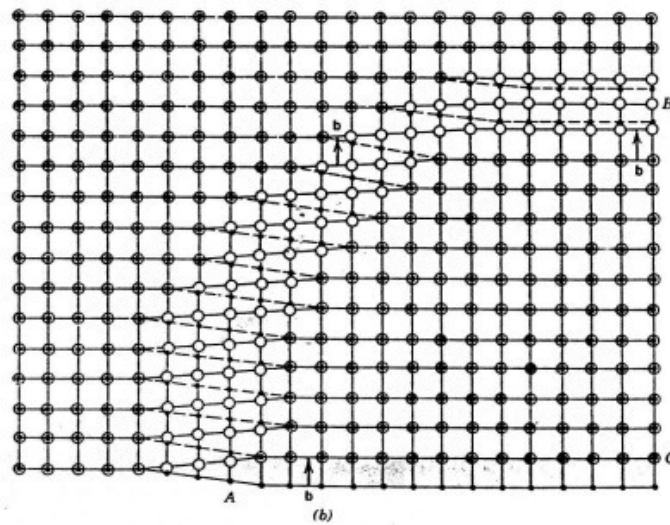
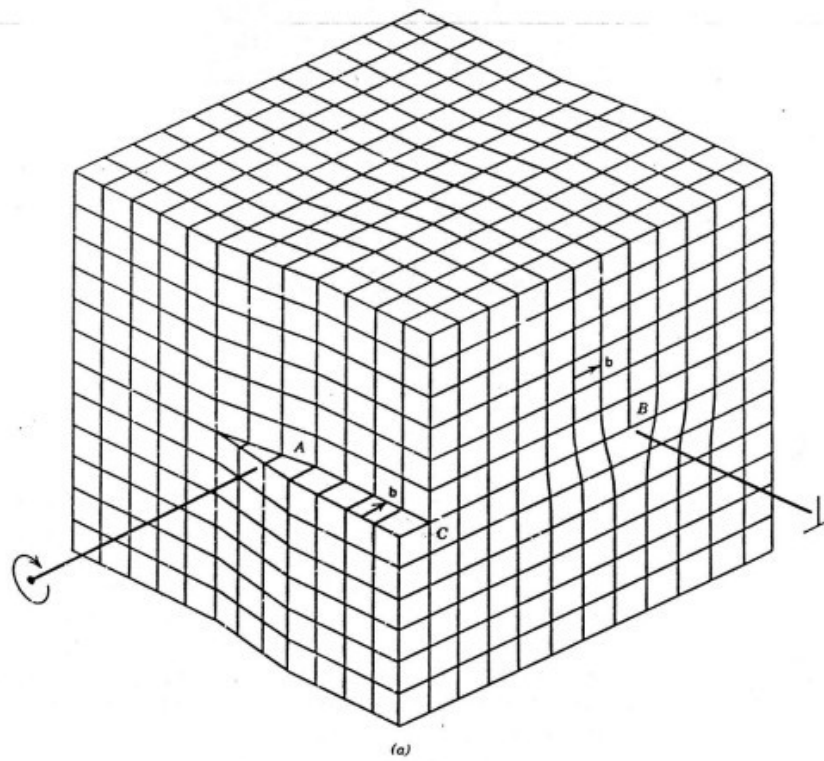
- Dislokasi sekrup :
adalah dislokasi yang terjadi karena gaya geser dimana bagian atas depan kristal bergeser kekanan sebesar satu atom terhadap bagian bawah "simbol:

- Dislokasi campuran :
adalah dislokasi pada material dimana terdapat kedua jenis dislokasi diatas.

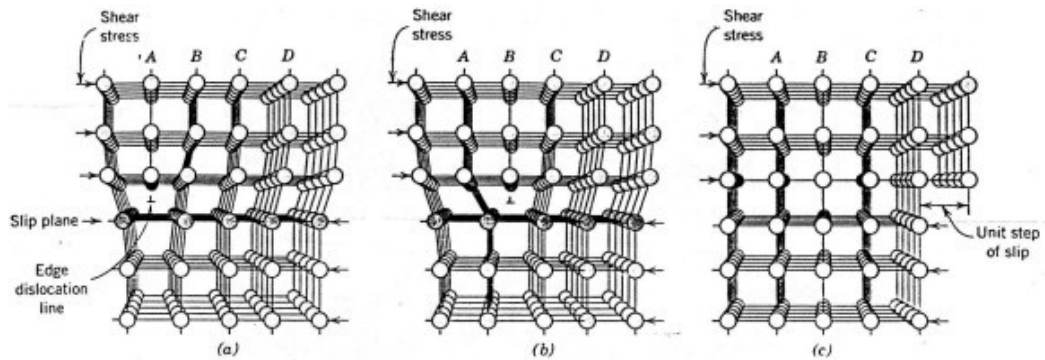


Gambar 3.2. (a) Dislokasi sekrup di dalam kristal. (b) Dislokasi sekrup pada : (a) dilihat dari atas. Garis dislokasi diperpanjang di garis AB . Posisi atom di atas bidang *slip* ditunjukkan oleh lingkaran putih, dan dibawah bidang *slip* ditunjukkan oleh lingkaran hitam.

Pada saat terjadinya deformasi plastis maka melibatkan pergerakan sejumlah besar dislokasi. Contoh pergerakan dislokasi garis bisa dilihat pada gambar 3.4.

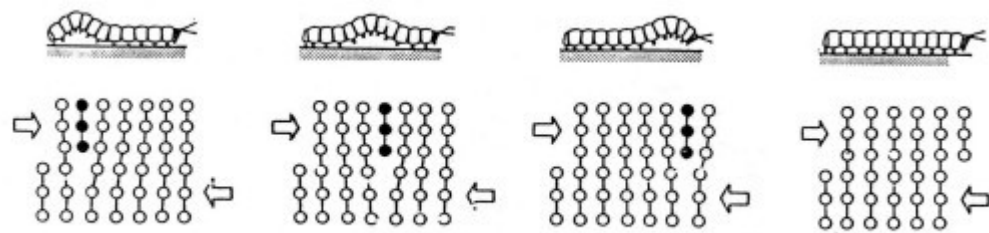


Gambar 3.3. (a) Skema dislokasi yang mempunyai dislokasi sisi, sekrup dan campuran. (b) Pandangan atas, dimana lingkaran kosong menyatakan posisi atom di atas bidang slip. Lingkaran hitam adalah posisi atom di bawah bidang slip. Pada titik A dislokasi murni sekrup, sementara pada titik B dislokasi murni sisi. Untuk daerah diantaranya, dimana terdapat kelengkungan di garis dislokasi, merupakan campuran dislokasi sisi dan sekrup.



Gambar 3.4. Pengaturan ulang posisi atom yang diakibatkan oleh gerakan dislokasi sisi ketika dislokasi bergerak karena adanya tegangan geser. (a) Setengah bidang tambahan di label dengan A. (b) Dislokasi bergerak sebesar satu atom ke kanan karena A berikatan dengan bagian bawah bidang B; pada prosesnya, bagian atas B menjadi setengah bidang tambahan. (c) Proses ini mengakibatkan timbulnya setengah bidang atom tambahan di sisi kanan.

Proses dimana deformasi plastis terjadi karena gerakan dislokasi disebut *slip*. Bidanganya disebut *bidang slip*. Gerakan dislokasi bisa digambarkan seperti gerakan seekor ulat (gb. 3.5).



Gambar 3.5. Ilustrasi analogi gerakan dislokasi dengan gerak maju ulat.

Secara makroskopis deformasi plastis karena gerakan dislokasi garis diperlihatkan kan pada gambar 3.6 dan karena gerakan dislokasi ulir / sekrup diperlihatkan pada gambar 7.6 b.

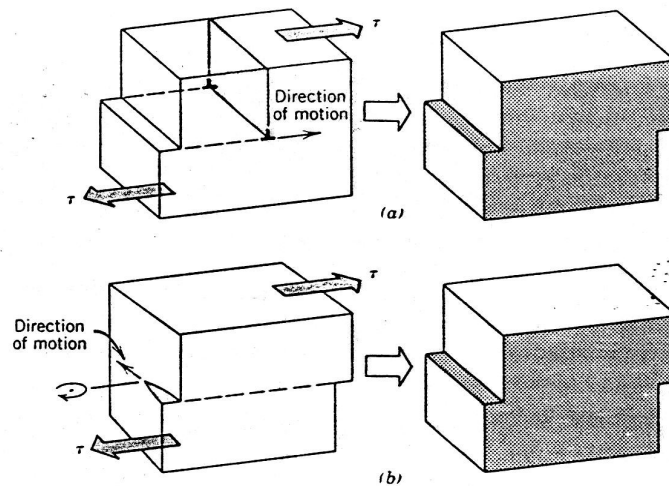
Dislokasi terbentuk pada saat pembekuan material, selama proses deformasi plastis dan karena tegangan termal pada proses pendinginan cepat

Kerapatan dislokasi ; adalah total panjang dislokasi per satuan volume .

satuan : mm dislokasi /mm³

logam, : kerapatan $\pm 10^3$ / mm²

logam terdeformasi berat : kerapatan $\pm 10 - 10^{10}$ /mm²

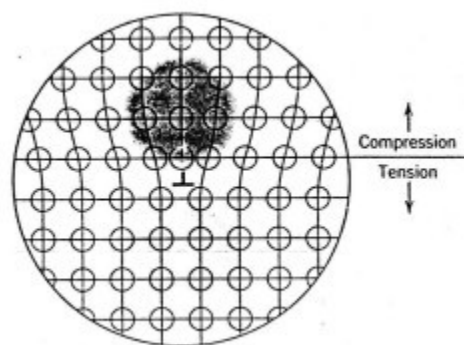


Gambar 3.6. Pembentukan permukaan bertingkat pada kristal karena gerakan (a) dislokasi sisi dan (b) dislokasi sekrup.

KARAKTERISTIK DISLOKASI

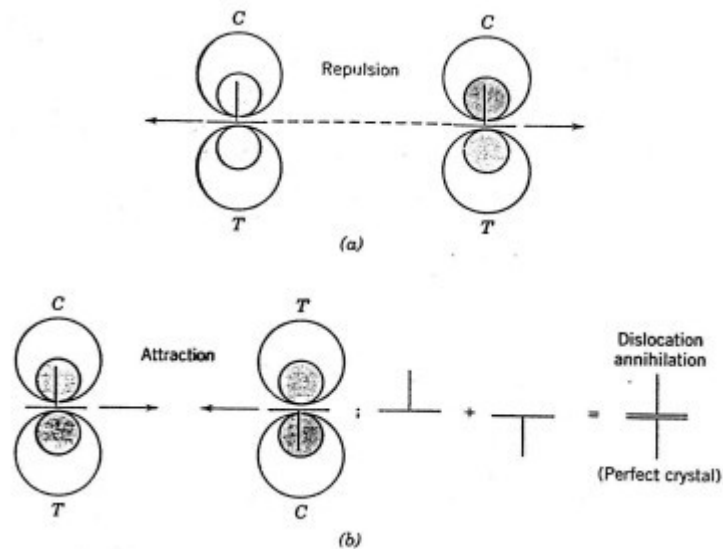
Beberapa karakteristik dislokasi berpengaruh kepada sifat mekanik material . Termasuk medan regangan yang berada disekitar dislokasi yang akan menentukan mobilitas dislokasi dan kemampuan untuk bertambah .

Jika logam mengalami deformasi, 5% energi deformasi tetap berada pada material, sisanya menjadi panas. Sebagian besar energi yang disimpan tersebut berupa energi pegangan dan berada disekitar dislokasi . Energi regangan berupa :tekan , tarik dan geser (gambar. 3.7.).



Gambar 3.7. Daerah kompresi (gelap) dan tarik (terang) berlokasi di sekitar dislokasi sisi.

Energi regangan disekitar dislokasi bisa berinteraksi dengan dislokasi tetangga berupa tarik-menarik atau tolak menolak dan sebaliknya. Ilustrasinya diperlihatkan pada gambar 3.8.



Gambar 3.8. (a) Dua dislokasi sisi dengan tanda sama dan berada pada bidang slip yang sama menghasilkan gaya tolak menolak satu sama lain; C dan T masing-masing menyatakan daerah kompresi dan tarik. (b) Dislokasi sisi dengan tanda yang berlawanan dan berada pada bidang slip yang sama menghasilkan gaya tarik menarik satu sama lain.

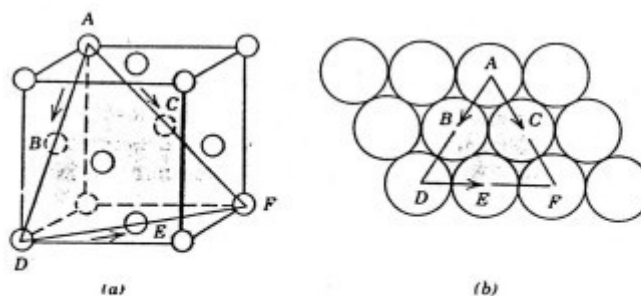
SISTEM SLIP

Gerakan dislokasi pada suatu bahan tidak sama kesetiap arah, ada bidang yang disukai (*prefer plane*) untuk terjadi gerakan dislokasi. Bidang ini disebut *bidang slip*. Sedangkan arah gerakan disebut *arah slip*. Gabungan dari keduanya disebut *sistem slip*. Slip systems : $\{111\} \langle 110 \rangle$

bidang : 111

arah : 110

Dari gambar : slip terjadi pada arah $\langle 110 \rangle$ didalam bidang $\{111\}$.



Gambar 3.9. (a) sistem slip $\{111\} \langle 110 \rangle$ pada sel satuan FCC. (b) Bidang (111) dari (a) dan tiga arah slip $\langle 110 \rangle$ (seperti yang ditunjukkan oleh panah) di dalam bidang dengan sistem slip yang mungkin.

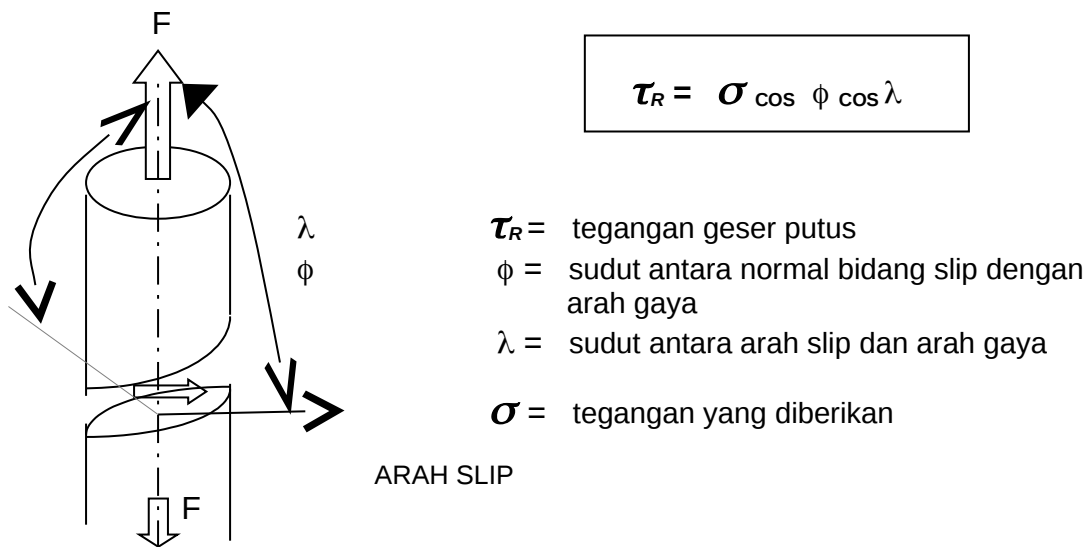
Tabel 3.1. Slip sistem beberapa bahan logam

Logam	bidang slip	arah slip	jumlah sistem slip
Face Centered Cubic			
Cu,Al.Ni,Ag,Au	{111}	< 110 >	12
Body Centered Cubic			
α -Fe, W, Mo	{ 110 }	< 1 1 1 >	12
α -Fe, W	{ 211 }	< 1 1 1 >	12
α -Fe, K	{ 321 }	< 1 1 1 >	24
Heksagonal Close-Packed			
Cd,Zn,Mg,Ti,Be	{0001}	<1120>	3
Ti,Mg,Zr	{1010}	<1120>	3
Ti, Mg	{1011}	<1120>	6

Makin banyak sistem slip maka material makin ulet, dan sebaliknya.

SLIP PADA KRISTAL TUNGGAL

Walaupun tegangan yang diberikan ke bahan murni tarik (atau tekan), komponen geser tetap timbul tetapi paralel atau tegak lurus terhadap arah stress. Hal ini disebut tegangan geser putus (*resolved shear stress*). Tegangan geser ini bergantung pada tegangan yang diberikan, dan orientasi bidang slip serta arah slip.



Pada logam kristal tunggal mempunyai sejumlah sistem slip yang berbeda. Tegangan geser putus besarnya akan berbeda pada setiap sistem slip karena besar ϕ

dan λ juga berbeda. Tapi ada satu bidang yang lebih disukai untuk terjadinya slip, biasanya pada bidang yang τ_r paling besar atau disebut juga $\tau_{r(max)}$

$$\tau_{R(max)} = \tau (\cos \phi \cos \lambda)_{max}$$

Karena tegangan tarik atau tekan maka slip pada kristal tunggal dimulai pada bidang yang mempunyai $\tau_r (max)$.

TEGANGAN GESER PUTUS KRITIS, τ_{CRSS} .

Adalah minimum tegangan geser yang diperlukan untuk mulai terjadinya slip. Pada sifat mekanik material titik dimana luluh mulai terjadi.

Titik luluh terjadi bila $\tau_R (MAX) = \tau_{CRSS}$

$$\sigma_y = \frac{\tau_{crss}}{(\cos \phi \cos \lambda)_{max}}$$

Minimum tegangan untuk terjadinya luluh adalah jika $\lambda = \phi = 45^\circ$ sehingga, $\tau_y = 2$

τ_{CRSS}

Contoh soal

Sebuah kristal tunggal besi bcc tegangan tarik diberikan pada arah $[0\ 1\ 0]$.

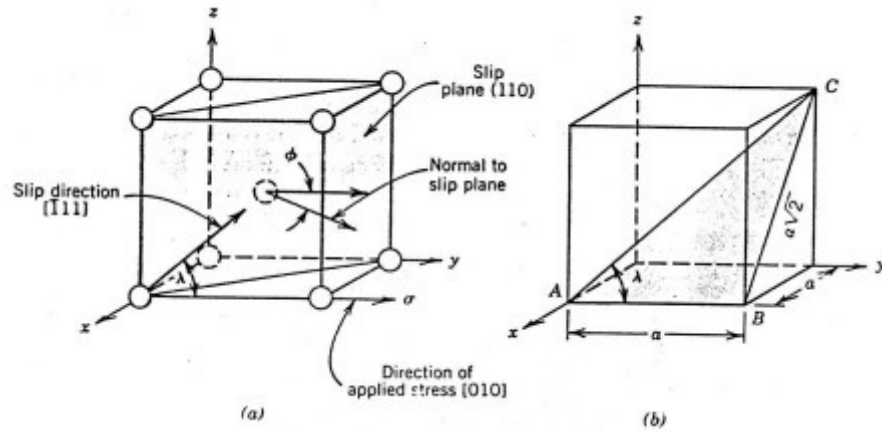
- hitung tegangan geser putus (resolved shear stress) pada bidang $(1\ 1\ 0)$ dan arah $[1\ 1\ 1]$ jika tegangan tarik adalah 7500-psi (52 MPa).
- jika slip terjadi bidang $(1\ 1\ 0)$ dan arah $[\bar{1}\ 1\ 1]$ dan tegangan geser putus kritis adalah 4350 psi (30 MPa), hitung besarnya tegangan tarik yang diberikan untuk terjadinya luluh.

Jawab :

- $\phi =$ sudut antara tegak lurus bidang $(1\ 1\ 0)$ dan arah $[0\ 1\ 0]$
 $= 45^\circ$

Dari segitiga abc λ (sudut antara $[1\ 1\ 1]$ dan $[0\ 1\ 0]$ adalah $\tan^{-1}(a\sqrt{2}/a) = 54,7^\circ$

$$\begin{aligned} \tau_R &= \sigma \cos \phi \cos \lambda = 52 \text{ MPa} (\cos 45) (\cos 54,7) \\ &= 21,3 \text{ MPa} (3060 \text{ psi}) \end{aligned}$$



b.

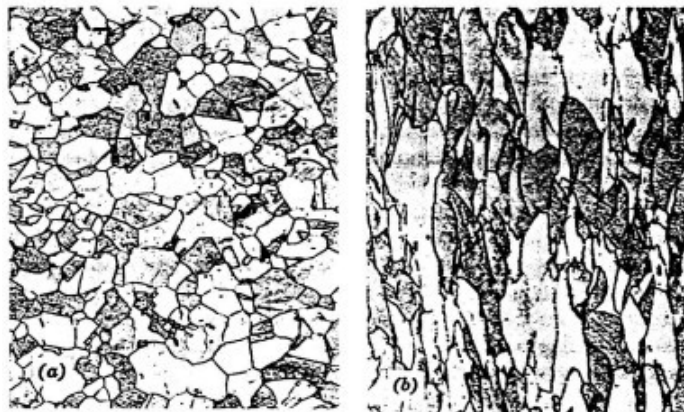
$$\sigma_y = \frac{\tau_{crss}}{(\cos \phi \cos \lambda)_{\max}}$$

$$= \frac{30 \text{ MPa}}{(\cos 45)(\cos 54,7)} = 73,4 \text{ Mpa (10600 psi)}$$

DEFORMASI PLASTIS BAHAN POLIKRISTAL

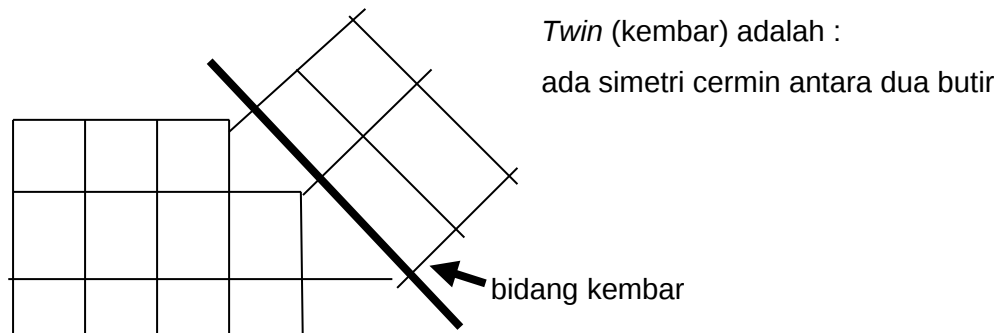
Deformasi dan slip pada bahan polikristal lebih kompleks. Polikristal terdiri dari banyak butiran (grain) yang arah slip berbeda satu sama lain. Gerakan dislokasi pada satu butir terjadi pada bidang yang lebih disukai ($\tau_r \text{ max}$).

Deformasi plastis secara keseluruhan terjadi pada masing – masing butiran, namun butiran tidak robek atau terbuka, namun tetap utuh, hanya bentuk butir yang berubah.



Gambar 3.10. Perubahan struktur butir dari logam polikristal karena deformasi plastis. (a) Sebelum deformasi, butir berbentuk bulat. (b) Deformasi menghasilkan butir yang memanjang. 170X.

DEFORMASI KARENA TWINNING (STRUKTUR KEMBAR)



Deformasi karena twinning adalah deformasi yang terjadi karena terbentuknya twin karena gaya geser yang diberikan (gambar atas)

Jumlah deformasi *twin* pada keseluruhan deformasi biasanya sedikit dibandingkan dengan slip.

MEKANISME PENGUATAN PADA LOGAM

Ahli metalurgi dan material sering dihadapkan pada kebutuhan bahan yang mempunyai sifat kekuatan tinggi, ulet dan tangguh. Namun biasanya membuat bahan yang mempunyai kekuatan tinggi akan menurunkan keuletan.

Mekanisme penguatan bahan berhubungan dengan gerak dislokasi dan sifat mekanik.

- Kemampuan metal berdeformasi plastis tergantung pada kemampuan dislokasi bergerak.
- Kekerasan dan kekuatan berhubungan dengan berkurangnya deformasi plastis yang terjadi.
- Makin gampang terjadinya deformasi plastis, makin gampang logam dibentuk.

Teknik penguatan bahan bergantung kepada prinsip :

- ✍ *Dengan menghambat gerak diskolasi maka material akan menjadi lebih kuat dan keras.*

Teknik penguatan dilakukan dengan cara :

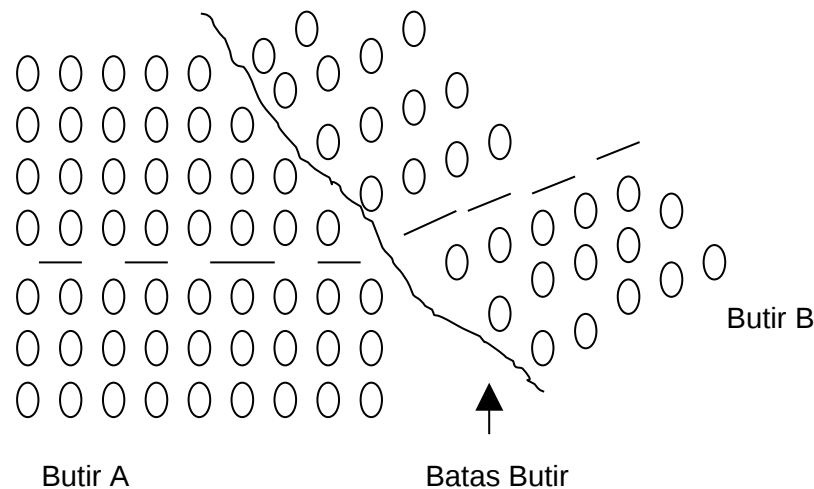
- Pengurangan ukuran butir
- Pemaduan solid – solution
- Pengerasan regangan (strain hardening)

PENGUATAN DENGAN PENGURANGAN UKURAN BUTIR

Pada saat deformasi plastis, slip atau dislokasi gerakannya akan menyeberang melewati batas butir, katakan dari butir a ke butir b. Dalam hal ini batas butir berfungsi sebagai penghalang karena dua alasan :

- 1) Karena dua butir mempunyai orientasi yang berbeda, dislokasi yang akan menyeberang ke b akan mengalami gerakan dengan arah yang berbeda. Hal ini menjadi lebih sulit ketika perbedaan orientasi menjadi lebih besar.
- 2) Ketidak teraturan susunan atom didalam butir akan mengakibatkan terputusnya bidang yang lain.

Perlu dicatat bahwa apa bila perbedaan sudut orientasi begitu besar adalah tidak mungkin bagi dislokasi bergerak melewati batas butir.

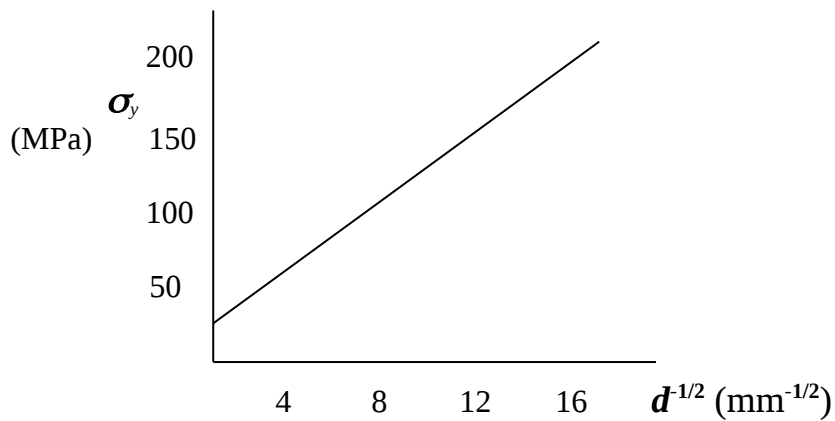


Material yang mempunyai butir yang halus atau kecil akan lebih kuat dan keras dibandingkan dengan yang mempunyai butir besar karena butir halus mempunyai total luas batas butir yang lebih besar yang akan menghambat gerakan dislokasi.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$$

d = diameter butir rata – rata

σ_0, k_y = Konstanta



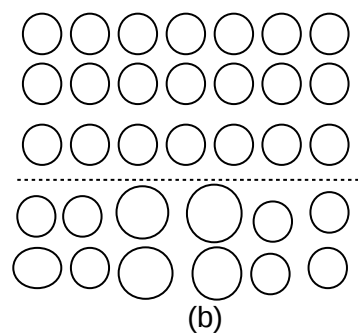
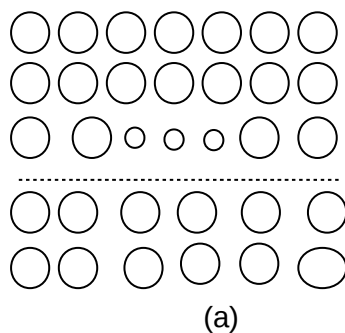
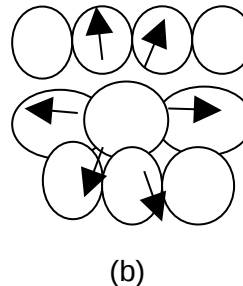
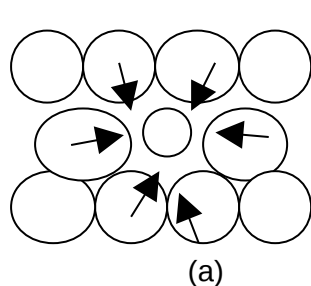
Bahan : 70 Cu – 30 Zn Brass Alloy.

PENGERASAN SOLID – SOLUTION

Solid solution (larutan padat) dibentuk ketika atom cair ditambahkan ke material induk, sementara struktur kristal dijaga sehingga tidak terbentuk struktur kristal baru.

Salah satu teknik pengerasan bahan adalah memadukan atau mencampurkan atom – atom asing / pengotor (pengerasan *solid – solution*). Logam dengan kemurnian tinggi umumnya lebih lunak dan lebih lemah. Dengan menaikkan bahan pengotor akan menaikkan kekuatan tarik dan kekerasan.

Atom pengotor / paduan akan memasuki area di dekat dislokasi sehingga akan menurunkan regangan tarik (atau tekan). Hal ini akan mengakibatkan dislokasi akan lebih sulit bergerak.



Ukuran atom pengotor lebih kecil Ukuran atom pengotor lebih besar

STRAIN HARDENING

Strain hardening : adalah fenomena dimana logam ulet menjadi lebih keras dan lebih kuat

Disebut juga *work hardening* (pengerasan kerja) atau disebut juga *cold working* (pengerjaan dingin). karena temperatur terjadinya deformasi adalah rendah (jauh dibawah titik leleh).

$$\% CW = \left[\frac{A_0 - A_d}{A_0} \right] \times 100$$

$\%CW$ = persen pengerjaan

A_0 = luas penampang mula-mula

A_d = luas penampang

Ketika logam mengalami pengerjaan dingin, maka kerapatan dislokasi naik dan jarak antar dislokasi menjadi lebih dekat. Regangan antar dislokasi – dislokasi tolak menolak, akibatnya gerakan dislokasi terhambat.

Contoh soal

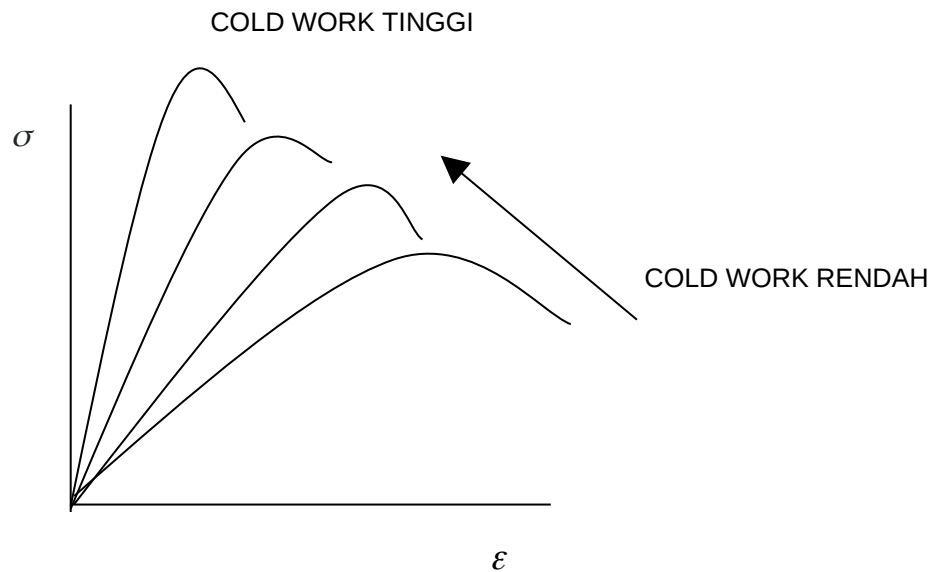
Hitunglah tegangan tarik dan keuletan (%EL) dari batang tembaga berbentuk silinder jika batang tersebut diberikan pengerjaan dingin sehingga diameter berkurang dari 15,2 mm menjadi 12,2 mm.

Jawab

Pertama-tama tentukan persentase pengerjaan dingin.

$$\% CW = \left(\frac{A_0 - A_d}{A_0} \right) \times 100$$
$$\% CW = \frac{\left(\frac{15,2 \text{ mm}}{2} \right)^2 \pi - \left(\frac{12,2 \text{ mm}}{2} \right)^2 \pi}{\left(\frac{15,2 \text{ mm}}{2} \right)^2 \pi} \times 100 = 35,6 \%$$

Kekuatan tarik diperoleh dengan melihat grafik pada gambar 3.11b untuk tembaga, dan diperoleh 340 MPa. Dari gambar 3.11c keuletan pada 35,6 %CW didapatkan 7% EL.



RECOVERY, REKRISTALISASI DAN PERTUMBUHAN

RECOVERY

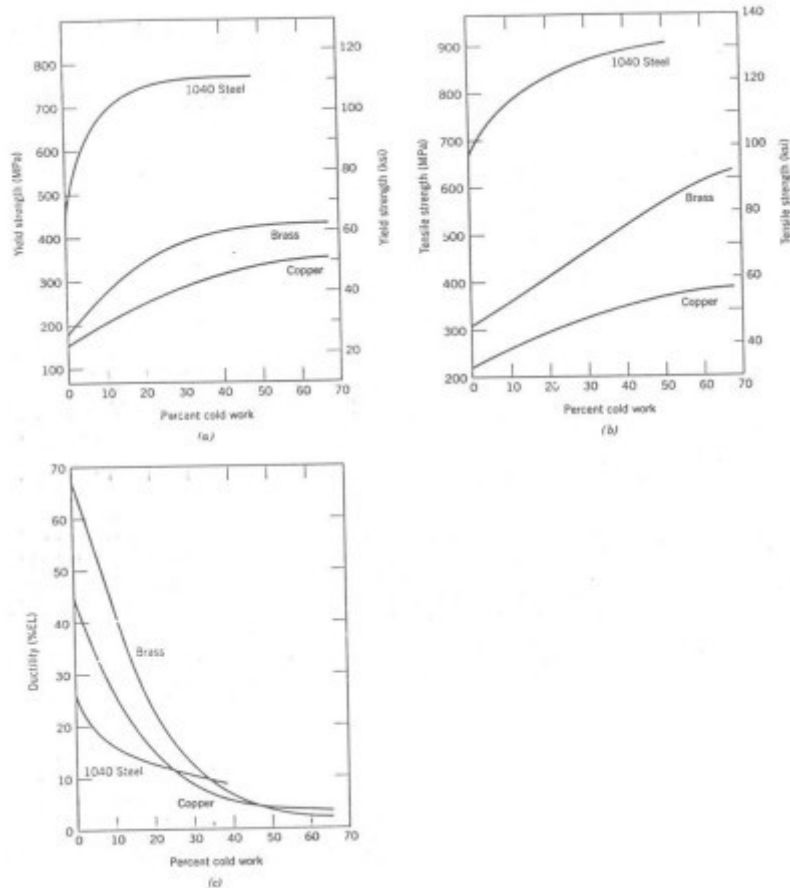
Recovery (penyembuhan) adalah pelepasan energi regangan didalam bahan karena gerakan diskolasi(karena gaya yang diberikan) disebabkan oleh difusi atom yang meningkat pada temperatur yang lebih tinggi.

sebagian energi regangan dilepaskan → jumlah diskolasi turun, konduktivitas listrik dan thermal menjadi lebih baik.seperti keadaan sebelum dilakukan pengerjaan dingin.

REKRISTALISASI

Walaupun "recovery" telah selesai, butir masih memiliki energi regangan yang tinggi.rekristalisasi adalah pembentukan butir "equiaxed" (bulat) baru yang bebas dari energi regangan dan mempunyai kerapatan diskolasi rendah.karakteristiknya seperti kondisi sebelum dilakukan pengerjaan dingin gaya penggerakan terbentuknya butir baru adalah karena perbedaan energi dalam antara material yang bebas energi regangan dengan yang mempuntai energi regangan.

Rekristalisasi → sifat-sifat mekanik kembali seperti kondisi sebelum dilakukan pengerjaan dingin.



Gambar 3.11. Untuk baja 1040, perunggu dan kuningan, (a) peningkatan kekuatan luluh, (b) kenaikan kekuatan tarik, (c) penurunan keuletan (%EL) dengan persen pengerjaan dingin.

Rekristalisasi bergantung atas waktu dan temperatur.

Contoh soal

Sebuah batang silinder dari kuningan (brass) yang mempunyai diameter awal 6,4 mm dilakukan pengerjaan dingin dengan penarikan sehingga luas penampangnya berkurang. Diperlukan bahan mempunyai kekuatan luluh (yield strength) 345 MPa dan keuletan (ductility) melebihi 20% EL. Selain itu diperlukan diameter akhir 5,1 mm. Jelaskanlah bagaimana hal ini dapat dicapai.

Jawab

Pertama-tama kita mempertimbangkan konsekuensi dari pengerjaan dingin (dalam hal kekuatan luluh dan keuletan) dimana diameter kuningan berkurang dari 6,4 mm (d_0) menjadi 5,1 mm (d_i). %CW dapat dihitung dengan:

$$\%CW = \frac{\left(\frac{d_0}{2}\right)^2 \pi - \left(\frac{d_i}{2}\right)^2 \pi}{\left(\frac{d_0}{2}\right)^2 \pi} \times 100$$

$$\% CW = \frac{\left(\frac{6,4 \text{ mm}}{2}\right)^2 \pi - \left(\frac{5,1 \text{ mm}}{2}\right)^2 \pi}{\left(\frac{6,4 \text{ mm}}{2}\right)^2 \pi} \times 100 = 36,5 \% \text{ CW}$$

Dari gambar 3.11a dan 3.11c , kekuatan luluh diperoleh 410 MPa dan keuletan 8% EL dari deformasi ini. Sesuai dengan permintaan, harga kekuatan luluh sudah memenuhi, namun harga keuletannya masih rendah.

Metode proses lain adalah pengurangan diameter secara parsial, diikuti dengan perlakuan panas rekristalisasi dimana efek pengerjaan dingin dihilangkan. Kekuatan luluh, keuletan dan diameter yang diperlukan dilakukan langkah penarikan kedua.

Dari gambar 3.11a menunjukkan bahwa 20%CW diperlukan untuk memberikan kekuatan luluh 345 MPa. Dengan kata lain, dari gambar 7.19c keuletan lebih besar dari 20%EL dapat diperoleh jika deformasi 23%CW atau kurang. Oleh karena itu, selama operasi penarikan akhir, deformasi mesti berada antara 20%CW sampai 23%CW. Ambil rata-rata 21,5%CW, dan kemudian hitung diameter akhir untuk penarikan pertama d_0' , dimana akan menjadi diameter awal bagi penarikan kedua.

$$21,5 \% CW = \frac{\left(\frac{d_0'}{2}\right)^2 \pi - \left(\frac{5,1 \text{ mm}}{2}\right)^2 \pi}{\left(\frac{d_0'}{2}\right)^2 \pi} \times 100$$

$$d_0' = 5,8 \text{ mm}$$

PERTUMBUHAN BUTIR (GRAIN GROWTH)

Setelah rekristalisasi selesai, butir yang terbentuk akan terus tumbuh atau membesar jika temperatur logam tetap dijaga, fenomena ini disebut pertumbuhan butir. Pertumbuhan butir terjadi karena berpindahnya batas butir. Tidak semua butir menjadi besar, tetapi butir besar tumbuh seiring menghilangnya butir lebih kecil.

Untuk bahan polikristal :

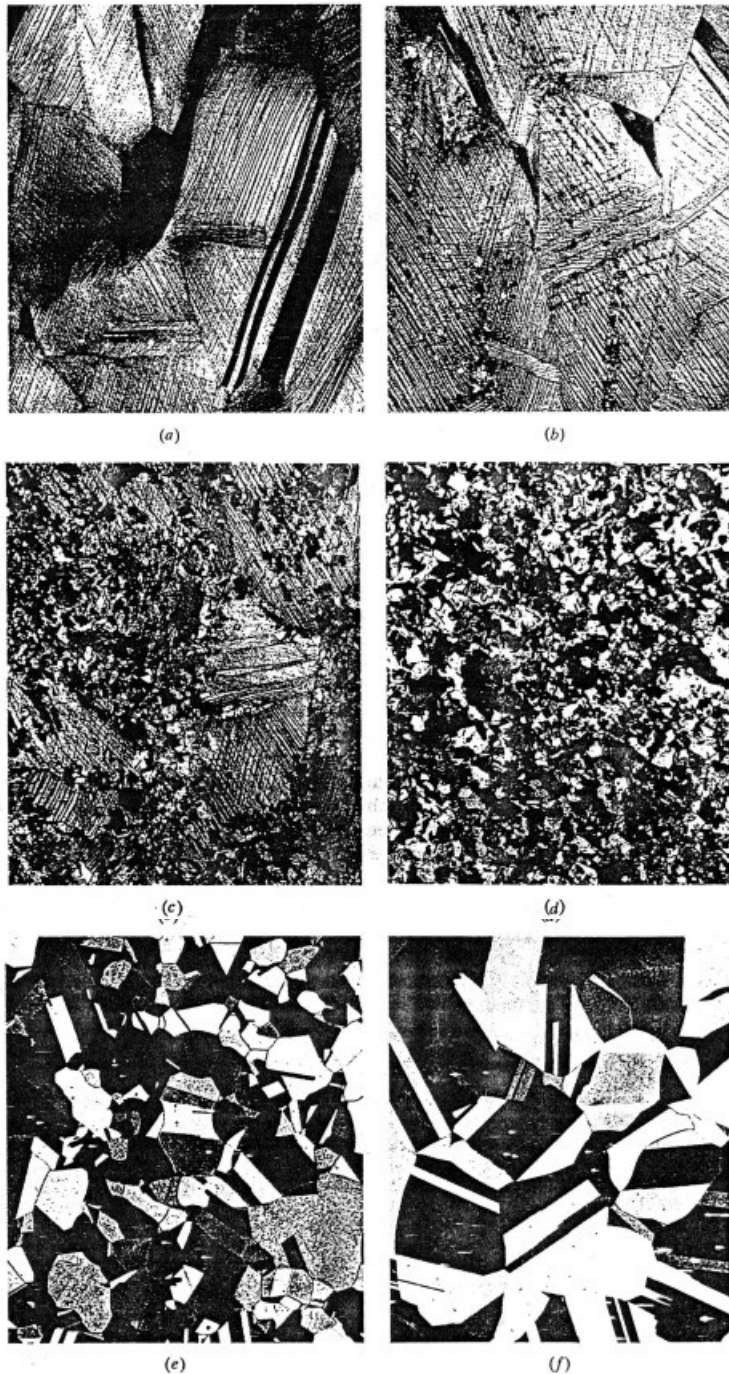
$$d^n - d_0^n = Kt$$

Dimana :

d_0 = diameter butir awal pada $t=0$

K, n = konstanta (tidak bergantung pada waktu)

$n > 2$



Gambar 3.12. Foto mikrograph yang memperlihatkan beberapa tingkatan rekristalisasi dan pertumbuhan butir perunggu. (a) struktur butir pengerjaan dingin (35% CW). (b) Tingkatan awal rekristalisasi setelah pemanasan 3 s pada 580°C ; butir yang sangat kecil adalah butir yang telah mengalami rekristalisasi. (c) Penggantian sebagian butir yang mengalami pengerjaan dingin dengan butir rekristalasi (4 s pada 580°C). (d) Rekristalisasi selesai (8 s pada 580°C). (e) Pertumbuhan butir setelah 15 menit pada 580°C . (f) Pertumbuhan butir setelah 10 menit pada 700°C . Semua foto dengan pembesaran 75X.

Soal soal

- Jelaskan apa yang dimaksud dengan *sistem slip*.
 - Apakah semua logam mempunyai sistem? Mengapa?
- Salah satu sistem slip pada struktur kristal BCC adalah $\{110\}\langle 111 \rangle$. Dengan cara yang sama dengan Gambar 7.6b, buatlah sketsa bidang jenis $\{110\}$ untuk struktur BCC, dengan menggambarkan posisi atom dengan lingkaran. Kemudian dengan tanda panah, tunjukkanlah dua arah slip $\langle 110 \rangle$ yang berbeda pada bidang ini.
- Jelaskan perbedaan antara tegangan geser putus dengan tegangan geser putus kritis.
- Kadang-kadang $\cos \phi \cos \lambda$ pada persamaan tegangan geser putus disebut dengan *faktor Schmid*. Tentukanlah besar *Schmid factor* untuk kristal tunggal FCC dengan arah $[100]$ paralel dengan sumbu beban.
- Sebuah spesimen silinder tembaga yang diberi pengerjaan dingin mempunyai keuletan (%EL) 15%. Jika jari-jari setelah pengerjaan dingin 6,4 mm, berapakah jari-jari sebelum deformasi?

BAB IV

FAILURE (KEGAGALAN)

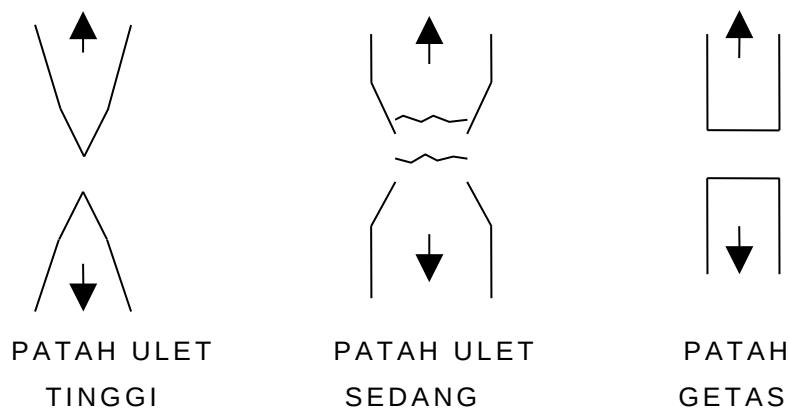
PATAH (*FRACTURE*)

Ada 2 jenis patah :

- Patah ulet
- Patah getas

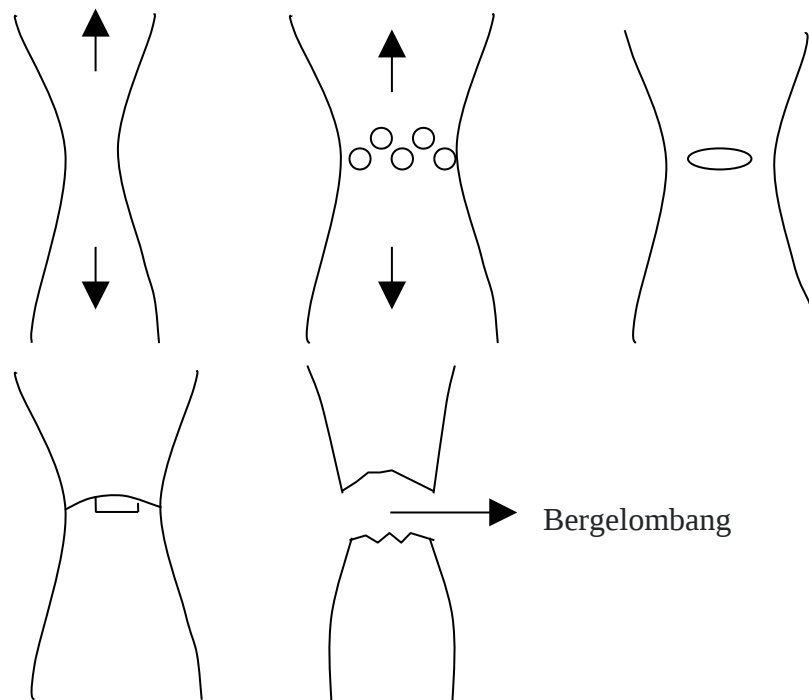
PATAH ULET:

Bentuk umum patah ulet yang terjadi pada bahan digambarkan seperti gambar dibawah ini.



- Patah ulet tinggi biasanya dijumpai pada logam lunak seperti:
 - Emas murni, timbal pada temperatur rendah.
 - Polimer, gelas inorganik pada temperatur tinggi
- Patah ulet sedang dijumpai umumnya pada logam
- Patah getas biasanya pada keramik

Patah biasanya terjadi atas beberapa tingkatan, yaitu: 'necking' (pengecilan penampang), terbentuknya rongga-rongga kecil, pembesaran rongga menjadi satu rongga besar atau terjadi retak tegak lurus gaya yang bekerja, dan pada akhirnya retak menjalar sampai terjadinya patah.



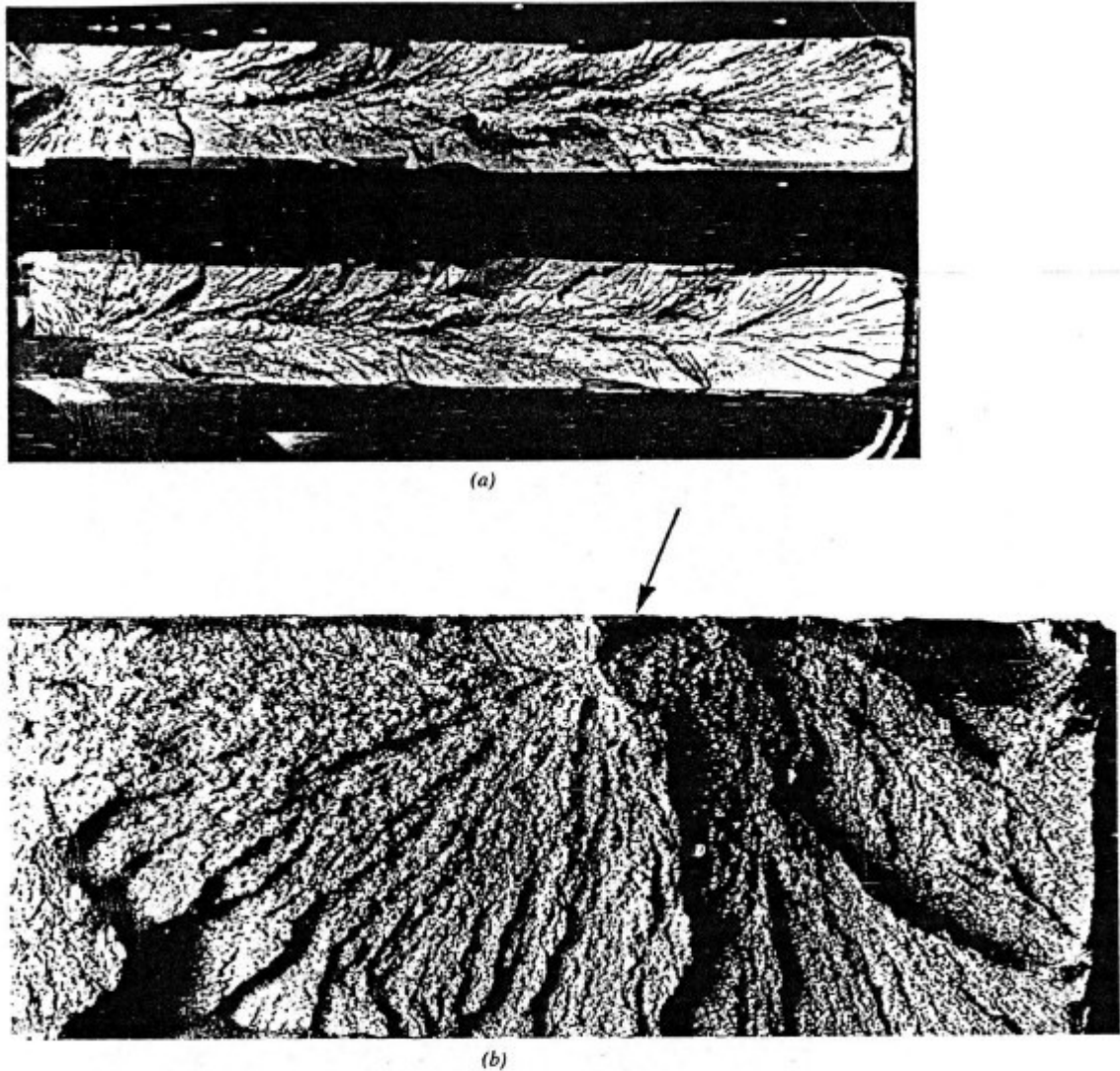
Biasanya patah yang terjadi berupa patah cangkir dan kerucut (*cup and cone fracture*), karena satu sisi patahnya berbentuk kerucut dan lainnya berbentuk cangkir/cup. Sudut patah biasanya 45° . Mekanisme patah yang lebih detail bisa dilihat secara mikroskopis dengan memakai mikroskop elektron. Ilmu yang mempelajari tentang patah secara mikro disebut *fractographic*.

PATAH GETAS

Patah getas terjadi tanpa deformasi yang bisa diamati dan rambatan retak yang cepat. Arah gerak retak adalah tegak lurus arah gaya yang bekerja. Permukaan patah dari patah getas biasanya berbentuk v-shaped 'chevron' atau pola kipas (gambar. 4.1a dan 4.1b).

- Patah getas pada bahan amorf seperti gelas keramik biasanya berkilat dan permukaannya halus.

Untuk sebagian besar bahan kristal, perambatan retak berhubungan dengan pemutusan ikatan atom yang besar dan berulang. Proses ini disebut 'cleavage' (perpecahan). Perpatahan ini disebut juga perpatahan transgranular (atau transcrySTALLINE), karena retak berjalan melewati butir/grain (gb.4.2a).

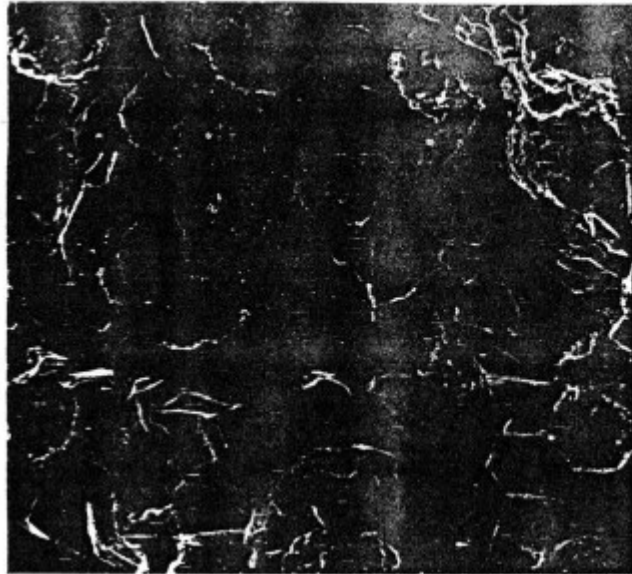


Gambar 4.1. (a) Fotografik yang menunjukkan bentuk-V “chevron” menandai karakteristik patah getas.

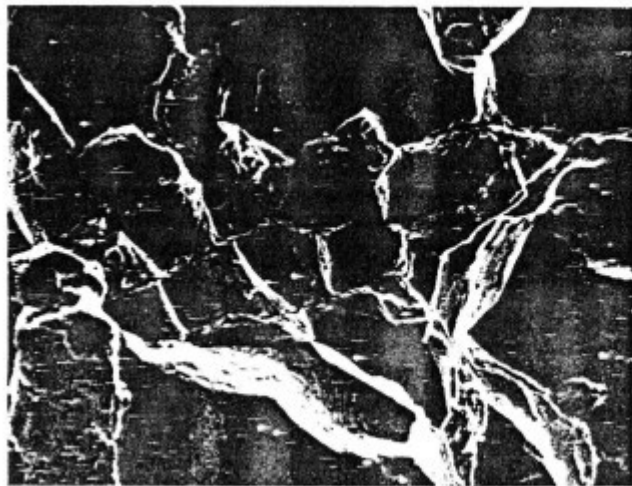
Pada beberapa aloi/paduan, perambatan retak adalah sepanjang batas butir, patah ini disebut intergranular. (gambar. 4.2b).

PRINSIP MEKANIKA PERPATAHAN

Kekuatan rekat bahan getas biasanya sebesar $E/10$ (E = modulus elastisitas). Kekuatan patah bahan teknik adalah antara 10 sampai 100 kali di bawah kekuatan rekat bahan. Tahun 1920, AA. Griffith memberikan teori bahwa perbedaan kekuatan ini antara teori dan praktek dikarenakan adanya cacat atau retak mikroskopis/sangat kecil dalam bahan yang akan menurunkan kekuatan bahan terhadap patah.

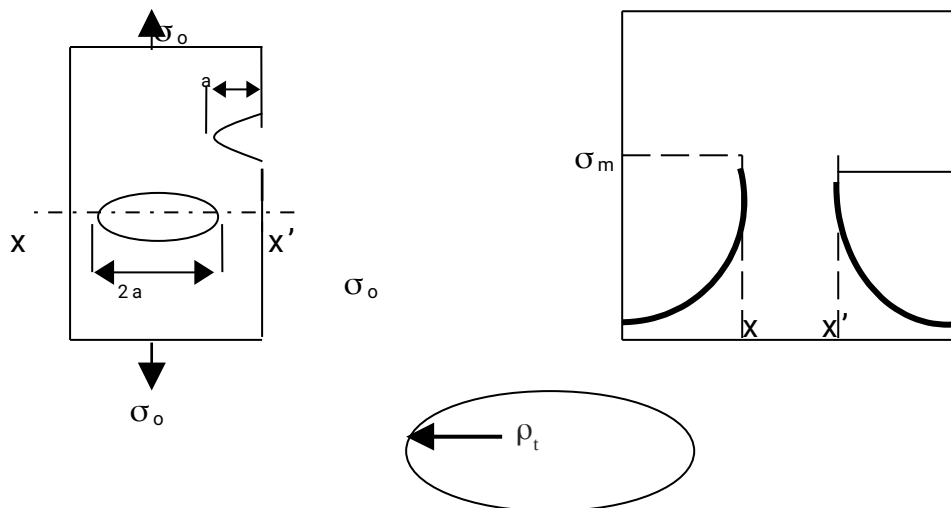


(a)



(b)

Gambar 4.2. (a) Grafik perpatahan mikroskop elektron scanning bahan besi tuang ulet yang memperlihatkan adanya patah permukaan antar butir. (b) Grafik perpatahan mikroskop elektron scanning yang memperlihatkan patah permukaan dalam butir. 1500X.



Pada daerah cacat, tegangan yang terjadi naik di atas tegangan yang diberikan. Cacat ini biasa juga disebut penaik tegangan (*stress raisers*). Jika cacat atau retak berbentuk elips dengan orientasi sumbunya tegak lurus gaya maka tegangan maksimum pada retak (σ_m) adalah:

$$\sigma_m = 2 \sigma_o \left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{3/2}$$

σ_o = tegangan yg diberikan

ρ_t = jari-jari kurva

a = panjang permukaan retak

Faktor konsentrasi, $K_t =$

$$K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_o} = 2 \left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{3/2}$$

Adanya cacat mikro yang menaikkan tegangan retak bahan juga berlaku pada cacat makro (gb.4.3).

Efek penaik tegangan akan dominan pada bahan getas daripada bahan ulet karena bahan ulet mengalami deformasi plastis yang mengakibatkan distribusi tegangan yang lebih merata di daerah sekitar cacat, sehingga faktor konsentrasi bahan ulet berada di bawah faktor konsentrasi teoritis. Menurut griffith, bahan getas selalu mengandung cacat mikro dengan variasi besar, geometri dan orientasi.

Teori Griffith Tentang Patah Getas

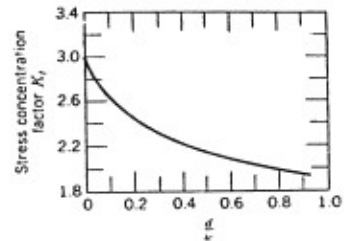
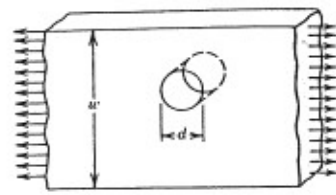
Selama penjalaran retak, terjadi pelepasan “energi regangan elastis” yaitu energi yang tersimpan pada bahan ketika mengalami deformasi elastis. Lebih jauh, pada saat retak, timbul permukaan bebas yang menaikkan energi permukaan sistem. Menurut griffith perambatan retak adalah karena pembentukan keseimbangan energi antara 2 energi permukaan ini. Tegangan kritis untuk terjadinya perambatan retak ia rumuskan :

$$\sigma_c = \left(\frac{2E \gamma_s}{\pi a} \right)^{1/2}$$

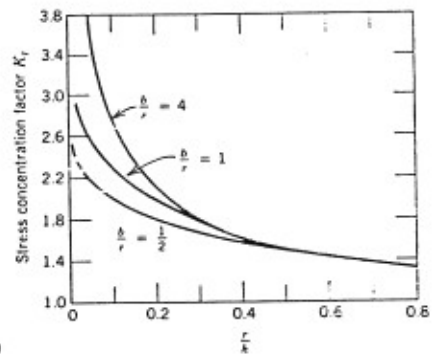
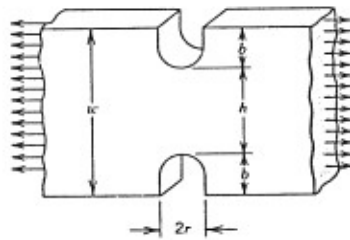
E = modulus elastisitas

γ_s = energi permukaan spesifik

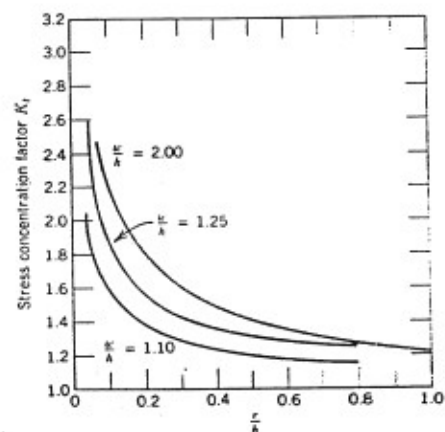
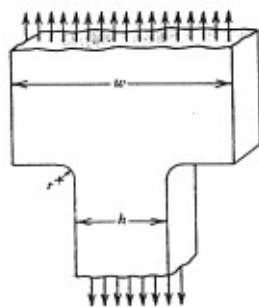
a = $1\frac{1}{2}$ panjang retak dalam



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.3. Kurva faktor konsentrasi tegangan teoritis untuk tiga bentuk geometri sederhana.

Untuk bahan yang mengalami deformasi plastis, harga γ_s diganti dengan $\gamma_s + \gamma_p$ dimana γ_p adalah energi deformasi plastis yang diberikan pada perpanjangan retak. Untuk bahan sangat ulet maka $\gamma_p \gg \gamma_s$.

Th 1950, g.r. irwin merumuskan :

$$\xi_c = 2 (\gamma_s + \gamma_p)$$

ξ_c = laju pelepas energi regangan

Perpanjangan retak terjadi jika tegangan melampaui harga ξ_c .

Contoh soal

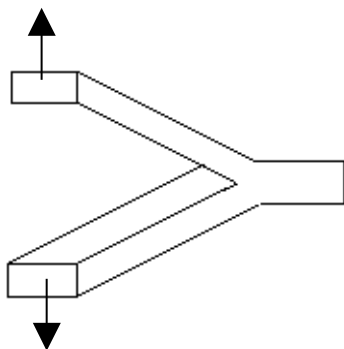
Pelat gelas dengan ukuran relatif besar mendapat tegangan tarik sebesar 40 MPa. Jika energi permukaan spesifik dan modulus elastisitas pelat masing-masingnya adalah 0,3 J/m² dan 69 Gpa, carilah panjang maksimum cacat permukaan yang mungkin terjadi tanpa terjadinya patah.

Jawab

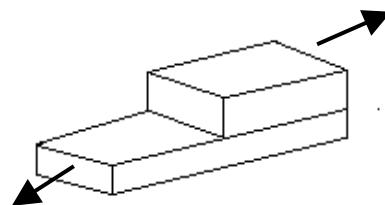
Diketahui: $\sigma = 40 \text{ MPa}$, $\gamma_s = 0,3 \text{ J/m}^2$, dan $E = 69 \text{ GPa}$.

$$\begin{aligned} a &= \frac{2E\gamma_s}{\pi\sigma^2} \\ &= \frac{(2)(69 \times 10^9 \text{ N/m}^2)(0,3 \text{ N/m})}{\pi(40 \times 10^6 \text{ N/m}^2)^2} \\ &= 8,2 \times 10^{-6} \text{ m} = 0,0082 \text{ mm} = 8,2 \text{ }\mu\text{m} \end{aligned}$$

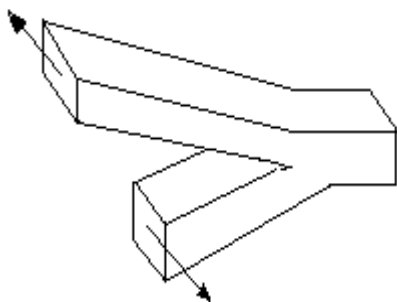
ANALISA TEGANGAN PADA RETAK



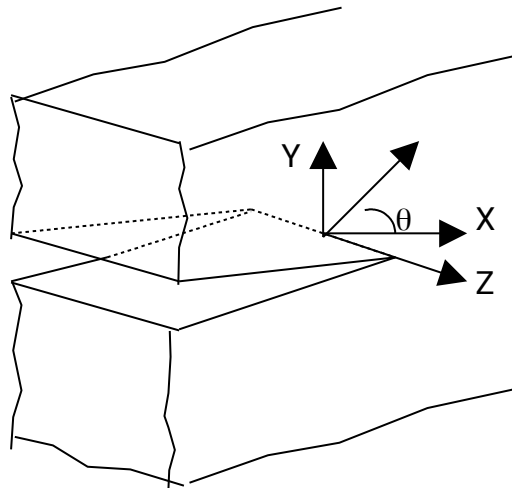
MODE I
TARIK



MODE II
SLIDING



MODE III
ROBEK



$$\sigma_x = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_x(\theta)$$

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_y(\theta)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{xy}(\theta)$$

K = faktor intensitas tegangan.

Bahan tipis : $\sigma_z = 0$

Bahan tebal : $\sigma_z = \nu (\sigma_x + \sigma_y)$; ν = rasio poisson

KETANGGUHAN PATAH (*FRACTURE TOUGHNESS*)

Ketangguhan patah dirumuskan dengan:

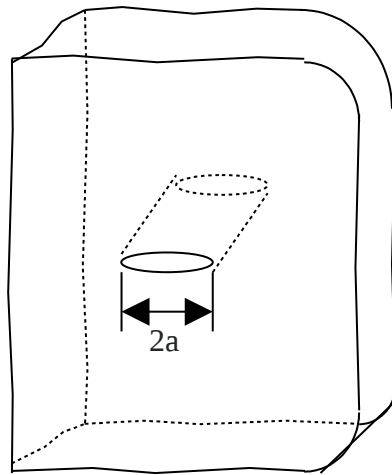
$$Kc = Y \sigma \sqrt{\pi \cdot a}$$

Kc = ketangguhan patah

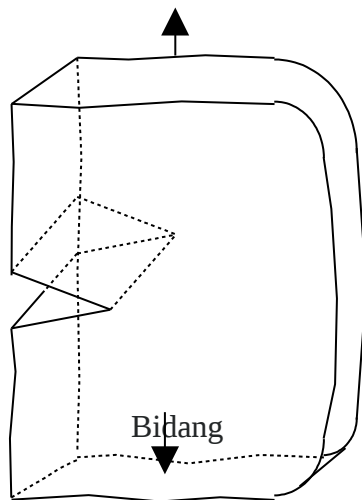
Y = Konstanta, tergantung bahan dan bentuk retak

= 1 (bahan dengan lebar tak terbatas).

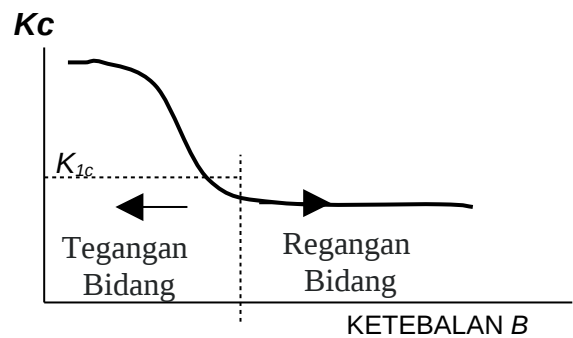
= 1,1 (bahan dengan lebar semi tak terbatas dengan retak pada sisinya)



Lebar Tak Terbatas Retak di Dalam



Lebar Semi Tak Terbatas Retak di Pinggir.



Untuk bahan tipis harga k_c sangat tergantung kepada ketebalan dan menurun dengan bertambahnya ketebalan.

Ketangguhan patah: adalah sifat bahan yang mengukur ketahanan bahan terhadap patah getas jika di dalam bahan ada retak.

Untuk bahan yang lebih tebal:

$$K_{ic} = y \sigma \sqrt{\pi} \cdot A$$

K_{ic} = ketangguhan patah regangan bidang

$K_{ic} < k_c$; tanda i pada k_{ic} berarti : mode I

Harga k_{ic} dipengaruhi oleh : temperatur, laju regang, struktur mikro, dll.

Suatu metode untuk mengecek kerusakan pada bahan adalah NDT (*non destructive testing*/uji tidak merusak) yang biasanya digunakan untuk mengecek adanya cacat di dalam atau di permukaan bahan.

UJI IMPAK

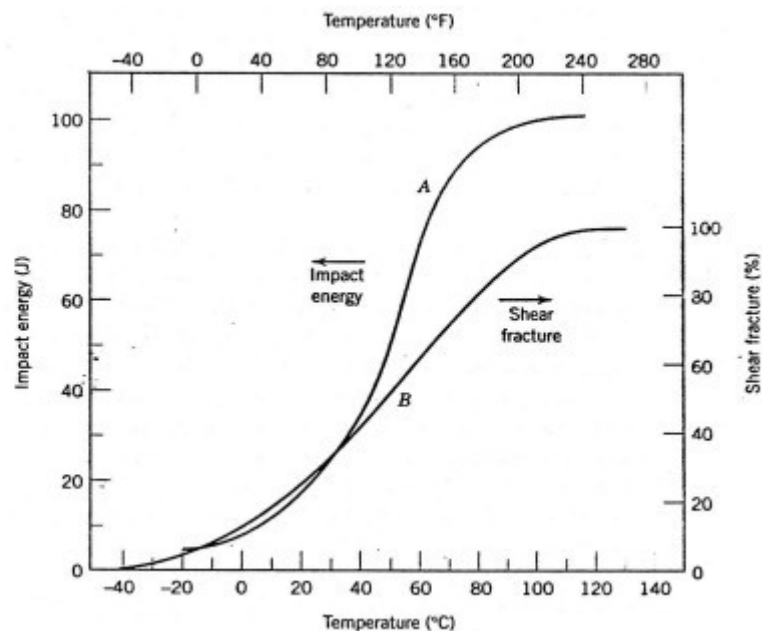
Dilakukan untuk mengetahui karakteristik bahan terhadap patah.

Dua standard : CHARPY dan IZOD

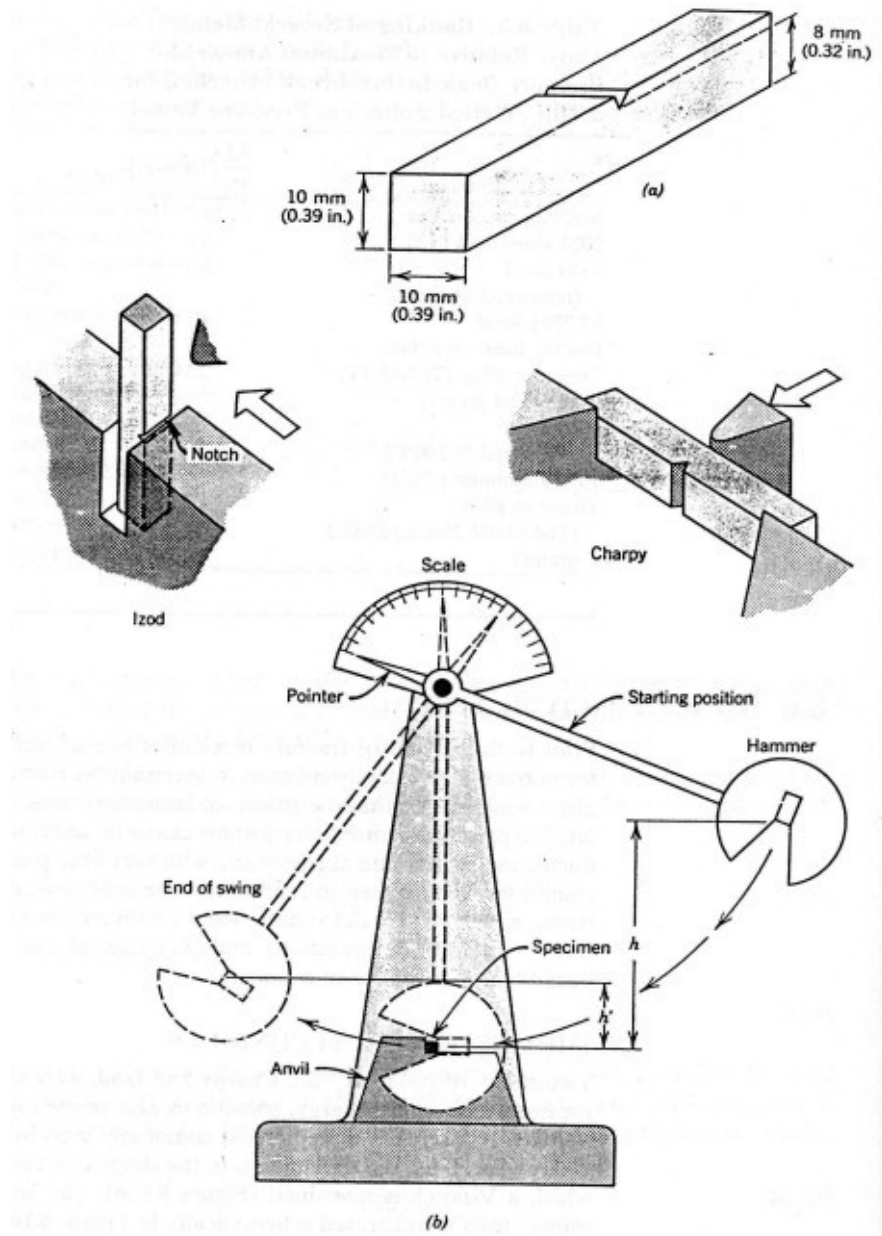
Perbedaannya pada spesimen diletakan. Pada uji impact yang diukur adalah energi impact dan disebut juga “ ketangguhan takik” (*notch toughness*).

Bahan yang diuji diberi takik, kemudian dipukul sampai patah dan diukur energi impactnya dengan melihat perbedaan ketinggian alat pukul sebelum dan sesudah diuji impact ($h - h'$, gb. 4.5).

Fungsi utama dari uji impact Charpy dan Izod untuk melihat apakah bahan mempunyai daerah transisi antara ulet dan getas dan kalau ada pada temperatur berapa terjadinya. Gambar 4.4. Adalah contoh bahan baja A283 yang mempunyai daerah transisi ulet ke getas.



Gambar 4.4. Energi impact takik-V Charpy yang bergantung temperatur (kurva A) dan persen patah geser (kurva B) untuk baja A283.



Gambar 4.5. (a) Spesimen yang digunakan untuk uji impak Charpy dan Izod. (b) Gambar skema alat uji impak. Palu dilepaskan dari ketinggian h dan mengayun sampai ketinggian h' .

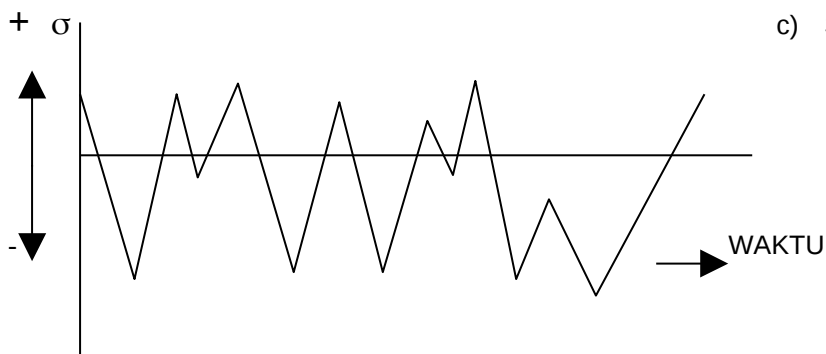
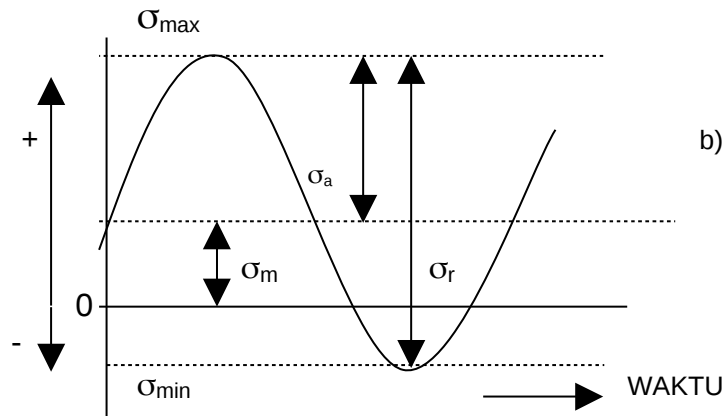
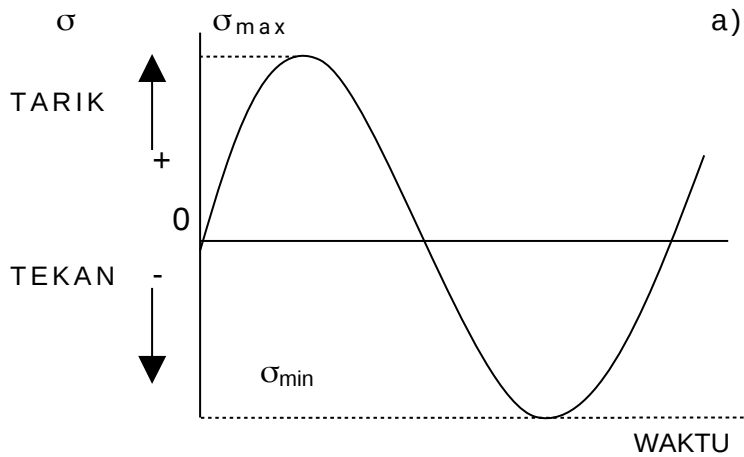
FATIGUE

Adalah *failure* pada struktur yang diakibatkan tegangan dinamis dan berfluktuasi. (contohnya jembatan, pesawat terbang, komponen –komponen mesin).

Kegagalan bisa terjadi walaupun beban menerima tegangan lebih rendah dari tegangan luluh bahan dengan pembebanan statis.

Bentuk kegagalan fatigue adalah seperti kegagalan pada bahan getas walaupun bahannya ulet sekalipun yaitu dimana permukaan patah tegak lurus terhadap tegangan yang bekerja.

TEGANGAN SIKLIK



- Tegangan rata-rata, σ_m :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

- Besar tegangan/jangkauan tegangan, σ_r :

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

tarik = (+) ; tekan = (-)

- Amplitudo tegangan, σ_a :

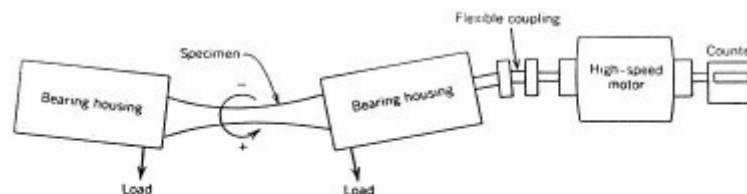
$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

- Rasio tegangan, R :

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

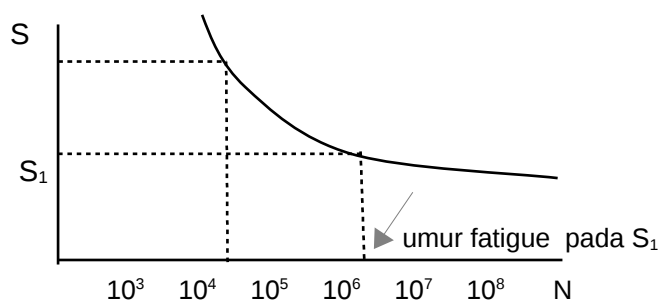
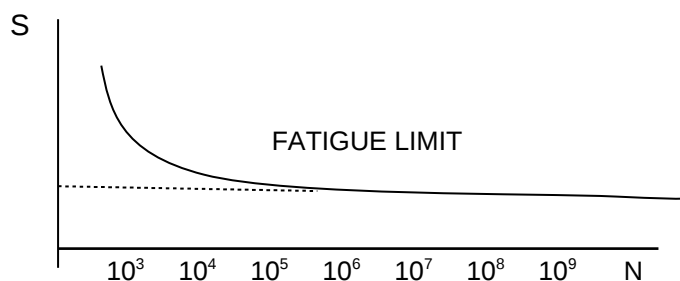
CURVA S – N

Pengujian fatigue menggunakan alat uji putar dan tekuk.



Gambar 4.6. Diagram skema alat uji fatigue untuk pengerjaan uji putar-bending.

Hasil pengujian digambarkan dalam grafik amplitudo tegangan, S (σ_a) dan jumlah putaran, N .



Bahan mempunyai 2 kurva S-N yaitu kurva yang mempunyai batas fatigue (*fatigue limit*) dan yang tidak mempunyai fatigue limit. Bahan jika diberikan tegangan di bawah tegangan “fatigue limit” maka tidak akan terjadi fatigue untuk putaran berapapun.

Pada kebanyakan baja, fatigue limit berkisar antara 35%-60% dari kekuatan tarik. Contoh bahan yang tidak mempunyai fatigue limit diantaranya : aluminium, tembaga, magnesium.

- Kekuatan fatigue : adalah level tegangan dimana terjadi kegagalan pada putaran tertentu.
- Umur fatigue (fatigue life) : adalah banyaknya putaran hingga terjadinya kegagalan pada tegangan tertentu.
- Fatigue siklus rendah : jumlah putaran untuk terjadinya fatigue adalah rendah ($< 10^4 - 10^5$)
- Fatigue siklus tinggi : jumlah putaran terjadinya fatigue $> 10^5$ siklus.

Proses fatigue dibagi 3 step :

- Mulai terjadinya retak
- Perambatan retak
- Kegagalan akhir, terjadi sangat cepat pada saat retak mencapai ukuran kritis.

$$N_f = N_i + N_p$$

N_f = umur fatigue.

N_i = siklus mulai terjadinya retak.

N_p = siklus perambatan retak.

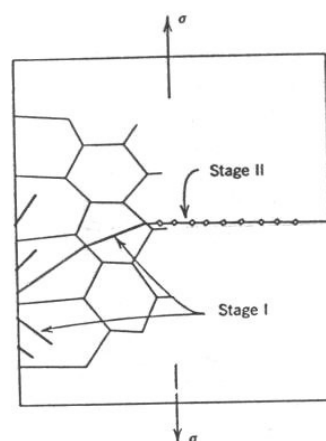
- Pada level tegangan rendah (fatigue siklus tinggi)

$$N_i > N_p$$

- Pada level tegangan tinggi (fatigue siklus rendah)

$$N_p > N_i$$

LAJU PERAMBATAN RETAK



PERAMBATAN RETAK FATIGUE

- Laju perambatan retak yang dibicarakan yaitu fatigue siklus tinggi.

Pada stage II : $\frac{da}{dN} = A (\Delta K)^m$

A, m = konstanta.

$m = 1 - 6.$

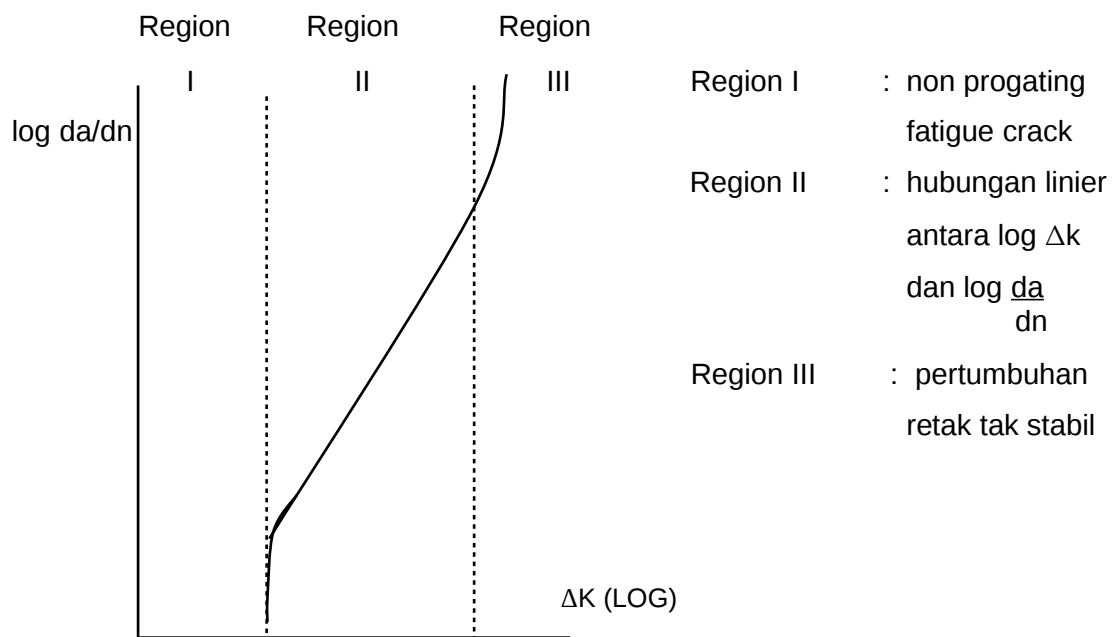
$\Delta K = K_{max} - K_{min}$

$\frac{da}{dN}$ = laju perambatan retak

$\Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi} \cdot a$

ΔK = faktor intensitas tegangan

$= Y (\sigma_{max} - \sigma_{min}) \sqrt{\pi} \cdot a$



Pada stage II :

$$dN = \frac{da}{A (\Delta K)^m}$$

Diintegral :

$$N_f = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{A (\Delta K)^m} = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{A (Y \Delta \sigma \sqrt{\pi} \cdot a)^m}$$

$$N_f = \frac{1}{A \pi^{m/2} (\Delta \sigma)^m} \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{Y^m a^{m/2}}$$

Contoh soal

Lembaran baja dengan ukuran relatif besar menerima tegangan tarik dan tekan secara berulang yang besarnya masing-masing 100 MPa dan 50 MPa. Sebelum pengujian, telah ditentukan bahwa panjang retak permukaan maksimal adalah 2,0 mm. Perkirakanlah umur fatigue lembaran ini jika ketangguhan patah regangan bidang adalah $25 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ dan harga m dan A masing-masingnya adalah 3,0 dan $1,0 \times 10^{-12}$, untuk $\Delta\sigma$ dalam MPa dan a dalam m. Diasumsikan bahwa parameter Y adalah independent terhadap panjang retak dan mempunyai nilai 1,0.

Jawab

Pertama-tama dicari panjang retak kritis, a_c :

$$\begin{aligned} a_c &= \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{1c}}{\sigma Y} \right)^2 \\ &= \frac{1}{\pi} \left(\frac{25 \text{ MPa} \sqrt{m}}{(100 \text{ MPa})(1)} \right)^2 = 0,02 \text{ m} \end{aligned}$$

dengan menggunakan 0,002 m sebagai batas bawah integral, nilai $\Delta\sigma$ 100 MPa, besarnya tegangan tarik, karena σ_{\min} tekan. Integrasikan menghasilkan:

$$\begin{aligned} N_f &= \frac{1}{A\pi^{m/2}(\Delta\sigma)^m} \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{Y^m a^{m/2}} \\ &= \frac{1}{A\pi^{3/2}(\Delta\sigma)^3 Y^3} \int_{a_0}^{a_c} a^{-3/2} da \\ &= \frac{1}{A\pi^{3/2}(\Delta\sigma)^3 Y^3} (-2) a^{1/2} \Big|_{a_0}^{a_c} \\ &= \frac{2}{A\pi^{3/2}(\Delta\sigma)^3 Y^3} \left(\frac{1}{\sqrt{a_0}} - \frac{1}{\sqrt{a_c}} \right) \\ &= \frac{2}{(1,0 \times 10^{-12})\pi^{3/2}(100)^3(1)^3} \left(\frac{1}{\sqrt{0,002}} - \frac{1}{\sqrt{0,02}} \right) \\ &= 5,49 \times 10^6 \text{ siklus} \end{aligned}$$

Faktor-faktor yang mempengaruhi umur fatigue

- Tegangan rata-rata
- Efek permukaan
- Faktor disain

- Perlakuan permukaan.
- Pengaruh lingkungan

Fatigue thermal : disebabkan karena tegangan termal fluktuasi pada temperatur tinggi.

$$\sigma = \alpha_1 E \Delta T$$

ΔT = perubahan temperatur

α_1 = koefisien ekspansi termal

E = modulus elastisitas

Fatigue korosi : kegagalan yang terjadi karena gaya simultan tegangan siklik dan serangan kimia.

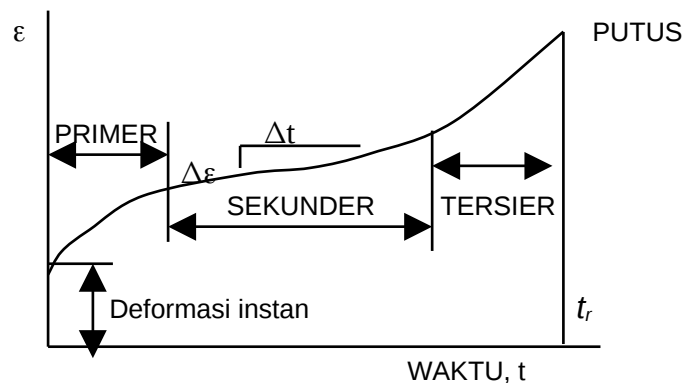
CREEP

Creep adalah deformasi yang terjadi pada material yang bekerja pada temperatur tinggi dan mengalami tegangan mekanik statis.

Contoh : rotor turbin pada mesin jet atau generator uap yang mengalami tegangan sentrifugal dan aliran uap betekanan tinggi.

Deformasi terjadi sebagai fungsi waktu.

Pada logam terjadi pada temperatur diatas $0,4 T_m$ (T_m = temperatur leleh).

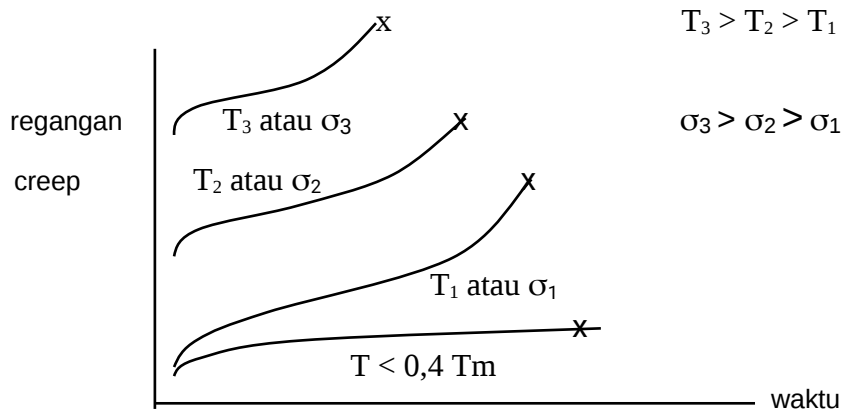


- Primer/creep transient : penurunan laju creep.
- Sekunder/steady state creep : laju creep konstan.
- Tersier creep : laju creep naik dengan cepat sampai putus.

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t}$$

$\dot{\epsilon}_s$ = laju steady state creep (kemiringan kurva creep sekunder)

EFEK TEMPERATUR DAN TEGANGAN



Laju creep steady state, $\dot{\epsilon}_s$:

$$\dot{\epsilon}_s = K_1 \sigma^n \quad \text{atau}$$

$$\dot{\epsilon}_s = K_2 \sigma^n \exp\left(\frac{-Q_c}{RT}\right)$$

K_1, n = konstanta

K_2, R = konstanta

Q_c = energi aktivasi

LOGAM PADUAN UNTUK PENGGUNAAN TEMPERATUR TINGGI

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi karakteristik creep dari logam yaitu : temperatur leleh, modulus elastisitas, ukuran butir. Makin tinggi temperatur leleh, makin besar modulus elastisitas dan makin besar ukuran butir, maka makin tahan material terhadap creep. Stainless steel, logam refraktori dan super-alloy lebih tahan terhadap creep sehingga banyak digunakan pada lingkungan kerja temperatur tinggi.

Soal-soal

1. Berapakah besar tegangan maksimum yang timbul pada ujung retak internal yang mempunyai jari-jari kurva $1,9 \times 10^{-4}$ mm dan panjang retak $3,8 \times 10^{-2}$ mm jika diberikan tegangan tarik sebesar 140 MPa.
2. Parameter K adalah fungsi tegangan nominal yang diberikan σ dan panjang a sebesar :

$$K = \sigma \sqrt{\pi a}$$

Hitunglah besarnya tegangan normal σ_x dan σ_y di depan permukaan retak yang panjangnya 2,5 mm karena tegangan tarik nominal 75 MPa pada posisi berikut ini:

- a. $r = 0,15$ mm, $\theta = 30^\circ$
 - b. $r = 0,15$ mm, $\theta = 60^\circ$
 - c. $r = 0,75$ mm, $\theta = 30^\circ$
 - d. $r = 0,75$ mm, $\theta = 60^\circ$
3. Sebutkanlah perbedaan yang jelas antara faktor intensitas tegangan, ketangguhan patah tegangan bidang, dan ketangguhan patah regangan bidang.
 4. Beberapa komponen pesawat dipabrikasi dari paduan aluminium yang mempunyai ketangguhan patah regangan bidang 35 MPa \sqrt{m} . Telah ditentukan bahwa patah terjadi pada tegangan 250 MPa jika panjang patah internal maksimum 2,0 mm. Untuk komponen dan paduan yang sama, apakah patah terjadi pada tegangan 325 MPa jika panjang retak internal maksimum adalah 1,0 mm. Mengapa?
 5. Data dibawah ini adalah data yang dikumpulkan dari uji impact Charpy pada besi tuang ulet.

Temperatur ($^\circ\text{C}$)	Energi Impak (J)
-25	124
-50	123
-75	115
-85	100
-100	73
-110	52
-125	26
-150	9
-175	6

- a. Plot data sebagai energi impact vs temperatur.
- b. Tentukanlah temperatur transisi ulet-ke-rapuh sebagai temperatur yang berkaitan dengan rata-rata energi impact maksimum dan minimum.
- c. Tentukanlah temperatur transisi ulet-ke-rapuh sebagai temperatur dimana energi impact adalah 80 J.

BAB V

SIFAT LISTRIK

- Hukum Ohm :

$$V = I.R$$

V = Tegangan, Volt

I = Arus, Ampere

R = Tahanan, Ohm

- Resistivitas, ρ :

$$\rho = \frac{R.A}{\ell} = \frac{VA}{I\ell}$$

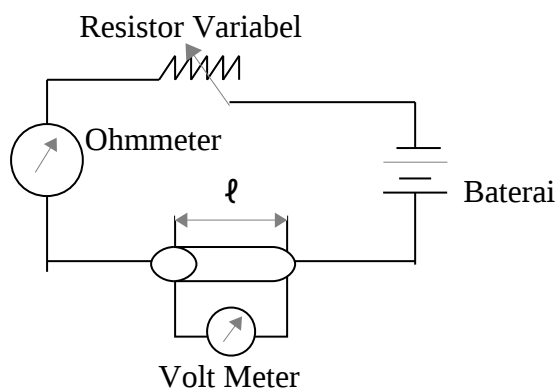
ρ = resistivitas, ohm-meter ($\Omega\cdot m$)

ℓ = jarak antara 2 titik pengukuran

A = Luas penampang tegak lurus dengan arah arus.

σ = Konduktivitas Listrik, $(\Omega\cdot m)^{-1}$ atau mho/m

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$



Gambar 5.1. Skema Pengukuran Tahanan Listrik

- Rapat Arus, J :

$$J = \sigma . E$$

J = Rapat arus, I/A

$$E = \text{Intensitas medan listrik}$$

$$= V/l$$

Berdasarkan sifat listriknya material dibedakan atas: konduktor, semi-konduktor, dan isolator.

- Konduktor → contoh: logam [$\sigma = 10^7 (\Omega M)^{-1}$]
- Isolator → σ antara 10^{-10} dan $10^{-20} (\Omega M)^{-1}$
- Semikonduktor → σ antara 10^{-6} dan $10^4 (\Omega M)^{-1}$

ARUS LISTRIK

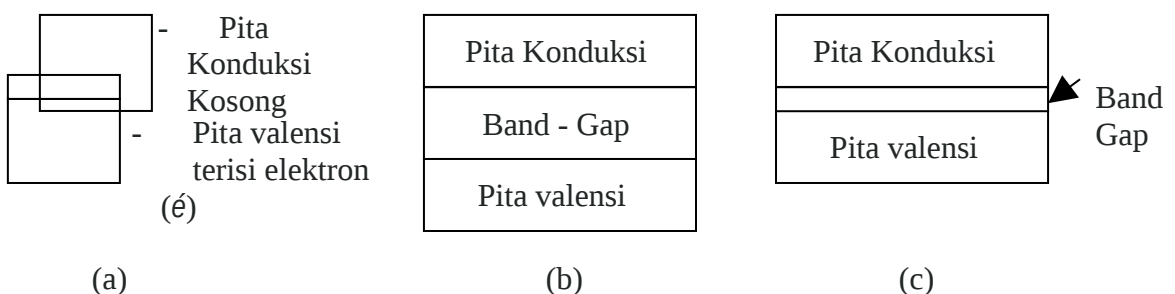
Adalah gerakan partikel muatan listrik karena gaya medan listrik yang diberikan

muatan (+) → searah medan

muatan (-) → berlawanan medan.

Pada bahan padat, arus listrik adalah pergerakan elektron atau disebut juga konduksi elektronik. Pada bahan ion, arus listrik adalah gerakan ion dan disebut juga konduksi ionik.

Sifat listrik bahan padat adalah konsekuensi struktur pita elektron terluar dan bagaimana pita ini diisi oleh elektron. Pita elektron terdiri dari dua bagian yaitu: pita valensi dan pita konduksi. Pita elektron menggambarkan tingkat energi yang dipunyai oleh elektron. Gambar 5.2 menunjukkan kondisi pita elektron untuk logam (magnesium), isolator dan semi konduktor. Band gap adalah selisih atau celah energi antara pita valensi dengan pita konduksi. Pada logam terlihat bahwa tidak terdapat celah energi antara pita valensi dan pita konduksi, namun kedua pita ini tumpang tindih satu sama lainnya.



Gambar 5.2. Kondisi pita elektron bahan padat pada 0°K . (a) Logam magnesium (tipikal logam), (b) Isolator → Band Gap $> 2 \text{ eV}$, dan (c) Semikonduktor → Band Gap $< 2 \text{ eV}$.

Arus listrik adalah elektron yang bergerak dimana Bergeraknya elektron ini terjadi apabila tingkat energinya berada pada pita konduksi.

RESISTIVITAS LISTRIK DARI LOGAM

Resistivitas listrik dipengaruhi oleh vibrasi termal, impuritas/pengotoran dan deformasi plastis. Secara matematis ditulis sebagai:

$$\rho_{total} = \rho_t + \rho_i + \rho_d$$

dimana notasi t = Vibrasi termal, i = impuritas, d = deformasi

- Resistivitas karena meningkatnya temperatur, dirumuskan dengan:

$$\rho_t = \rho_0 + aT$$

dimana : ρ_0, a = konstan

T = temperatur

- Resistivitas karena impuritas:

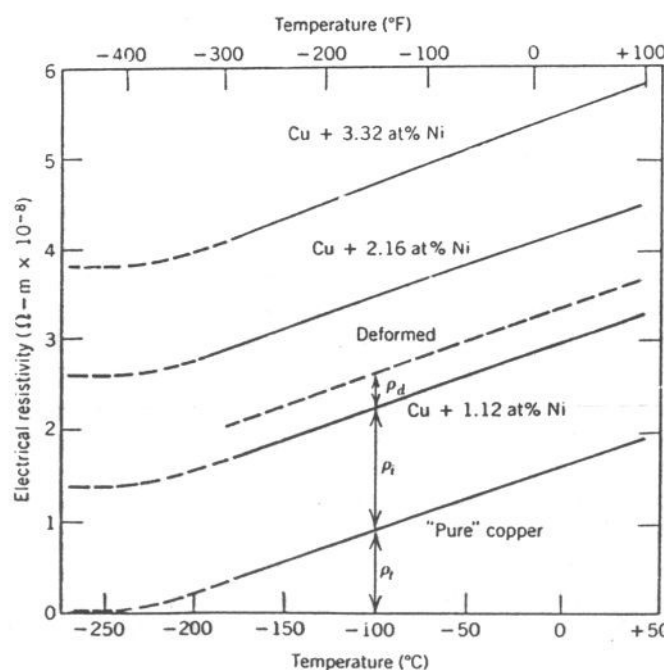
$$\rho_i = AC_i (1 - C_i)$$

C_i = Konsentrasi impuritas

A = konstanta tidak tergantung komposisi

- Resistivitas karena deformasi.

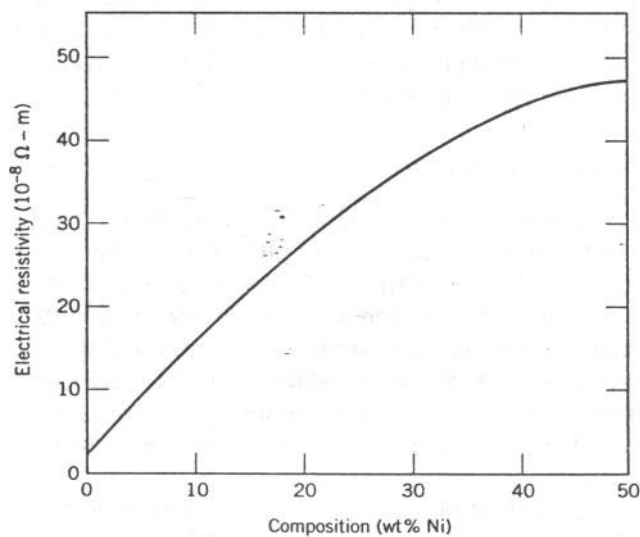
Deformasi plastis akan menaikkan resistivitas karena kenaikan jumlah dislokasi oleh penyebaran elektron. Efek deformasi terhadap resistifitas diperlihatkan oleh gambar 5.3.



Gambar 5.4 memperlihatkan pengaruh komposisi terhadap resistivitas listrik.

Tabel 5.1. Konduktivitas listrik pada temperatur ruang untuk sembilan logam dan paduan yang umum.

Logam	Konduktivitas listrik ($\Omega\text{-m}$) ⁻¹
Perak	$6,8 \times 10^7$
Tembaga	$6,0 \times 10^7$
Emas	$4,3 \times 10^7$
Aluminium	$3,8 \times 10^7$
Besi	$1,0 \times 10^7$
Kuningan (70 Cu – 30 Zn)	$1,6 \times 10^7$
Platinum	$0,94 \times 10^7$
Baja karbon biasa	$0,6 \times 10^7$
Baja tahan karat	$0,2 \times 10^7$



Gambar 5.4. Resistifitas listrik pada temperatur ruang vs komposisi pada paduan tembaga-nikel.

SEMI KONDUKTIVITAS

Konduktivitas bahan semi konduktor tidaklah sebesar logam namun memberikan manfaat yang besar. Oleh sebab itu bahan ini disebut bahan semi konduktor.

Dua jenis Semi konduktor :

- semikonduktor intrinsik : bahan murni tanpa adanya pengotor bahan lain
- semikonduktor ekstrinsik : bahan mengandung impuritas dari bahan lain

Semikonduktor Intrinsik

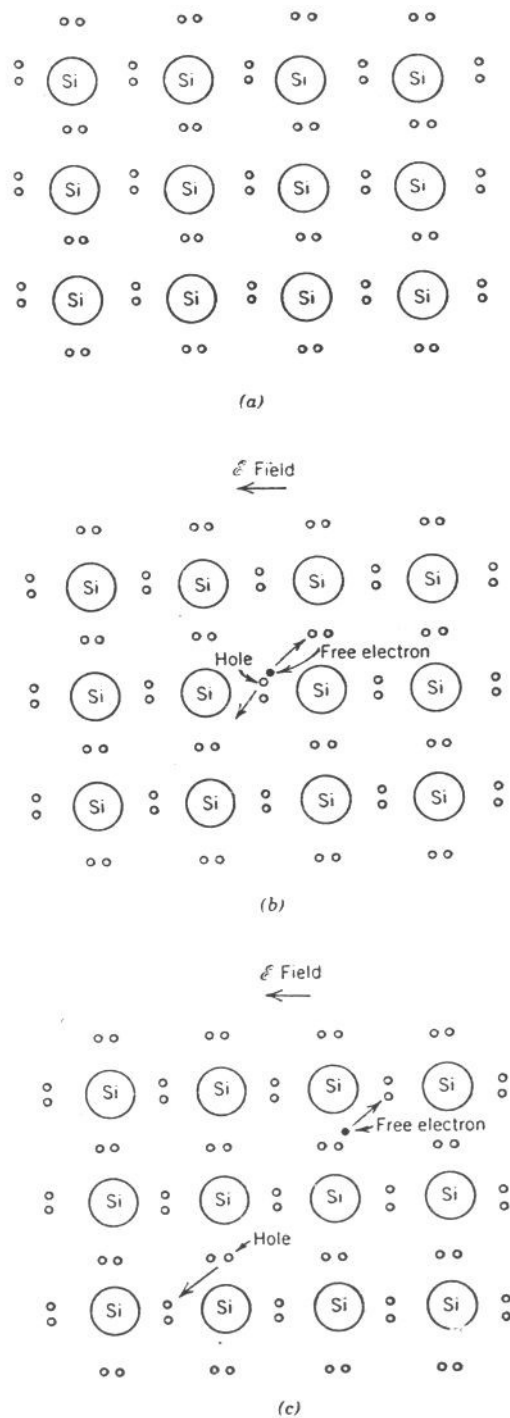
Semikonduktor intrinsik mempunyai karakteristik seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2c. Dua bahan semikonduktor elemental adalah silikon (Si) dan germanium (Ge) yang masing-masingnya mempunyai energi band gap 1,1 dan 0,7 eV. Kedua unsur ini berada pada group IVA pada tabel periodik dan mempunyai ikatan kovalen. Senyawa-senyawa tertentu juga mempunyai sifat semikonduksi intrinsik seperti senyawa antara unsur golongan IIIA dengan VA. Sebagai contoh galium arsenide (GaAs) dan indium antimonide (InSb). Senyawa yang terdiri dari unsur golongan IIB dan VIA juga memperlihatkan sifat semi konduksi seperti cadmium sulfide (CdS) dan zinc telluride (ZnTe). Tabel 2 memberikan harga band gap untuk beberapa senyawa semikonduktor.

Tabel 5.2. Energi band gap, mobilitas elektron dan hole dan konduktivitas listrik intrinsik pada temperatur ruang untuk berbagai bahan semikonduktor.

Bahan	Band gap (eV)	Konduktivitas Listrik ($\Omega\text{-m}^{-1}$)	Mobilitas elektron ($\text{m}^2/\text{V-s}$)	Mobilitas hole ($\text{m}^2/\text{V-s}$)
Elemental				
Si	1,11	4×10^{-4}	0,14	0,05
Ge	0,67	2,2	0,38	0,18
Senyawa III-V				
GaP	2,25	-	0,05	0,002
GaAs	1,42	10^{-6}	0,85	0,45
InSb	0,17	2×10^{-6}	7,7	0,07
Senyawa II-VI				
CdS	2,40	-	0,03	-
ZnTe	2,26	-	0,03	0,01

Konsep Hole

Pada semikonduktor intrinsik, untuk setiap elektron yang mengalami kenaikan energi ke level pita konduksi akan meninggalkan kekosongan elektron pada salah satu dari ikatan kovalennya. Dibawah pengaruh medan listrik, posisi kehilangan elektron pada kisi kristal bisa digambarkan sebagai gerakan elektron valensi yang lain yang secara berulang akan mengisi kekosongan ini (gambar 5.5). Proses ini bisa dijelaskan dengan memperlakukan daerah yang kehilangan elektron ini sebagai partikel yang bermuatan positif atau disebut juga *hole*. Hole dianggap mempunyai muatan sama dengan elektron tetapi dengan tanda yang berlawanan ($+1,6 \times 10^{-19}$ C). Sehingga dengan adanya medan listrik, elektron yang tereksitasi dan hole bergerak saling berlawanan arah.



Gambar 5.5. Model konduksi listrik pada semi konduktor intrinsik silikon. (a) sebelum eksitasi. (b) dan (c) setelah eksitasi (elektron bergerak karena medan listrik).

Konduktivitas Intrinsik

Karena ada dua pembawa muatan (elektron bebas dan hole) pada semikonduktor intrinsik, maka rumus konduktivitas menjadi:

$$\sigma = n|e|\mu_e + p|e|\mu_h$$

dimana: p = jumlah hole per meter kubik

n = jumlah elektron per meter kubik

μ_h = mobilitas hole

μ_e = mobilitas elektron

Untuk semikonduktor intrinsik:

$$n = p$$

sehingga:

$$\sigma = n|e|(\mu_e + \mu_h) = n|e|(\mu_e + \mu_h)$$

Contoh soal

Untuk silikon intrinsik, konduktivitas listrik pada temperatur ruang adalah $4 \times 10^{-4} (\Omega\text{-m})^{-1}$; mobilitas elektron dan hole masing-masingnya adalah 0,14 dan 0,048 $\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. Hitunglah konsentrasi elektron dan hole pada temperatur ruang.

Jawab.

Karena bahan adalah intrinsik, konsentrasi elektron dan hole akan sama, sehingga:

$$\begin{aligned} n = p &= \frac{\sigma}{|e|(\mu_e + \mu_h)} \\ &= \frac{4 \times 10^{-4} (\Omega\text{-m})^{-1}}{(1,6 \times 10^{-19} \text{ C})(0,14 + 0,048 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s})} \\ &= 1,33 \times 10^{16} \text{ m}^{-3} \end{aligned}$$

Semi konduktor ekstrinsik

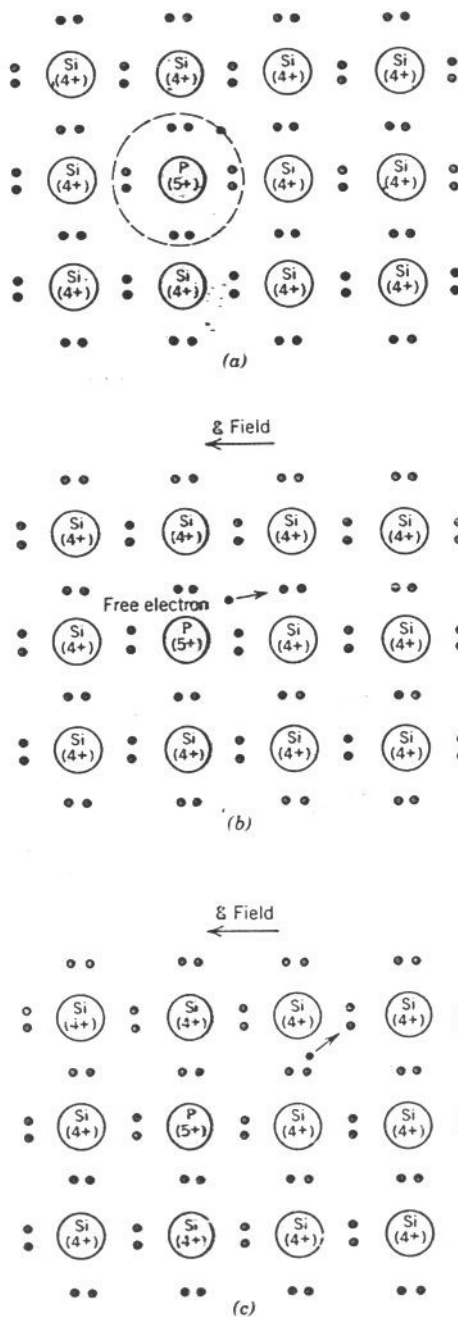
Bahan semi konduktor yang diberikan/mengandung impuritas .

Pada kenyataannya semua semikonduktor komersial adalah berjenis ekstrinsik, sehingga sifat listriknya ditentukan oleh impuritas.

misal : bahan semikonduktor diberikan impuritas fosfor (p)

semikonduktor ekstrinsik:

- tipe n: kelebihan elektron
- tipe p : kelebihan hole dan kekurangan elektron



Gambar 5.6. Model semikonduktor jenis-n. (a) atom pengotor seperti posfor mempunyai elektron valensi 5 yang akan menggantikan elektrton silikon, dan menyisakan 1 ikatan elektron ekstra. (b) Eksitasi membentuk elektron bebas. (c) Pergerakan elektron bebas karena medan listrik.

Semikonduktor Ekstrinsik Tipe-n

Silikon (Si) mempunyai elektron valensi yang masing-masingnya berikatan kovalen dengan elektron valensi unsur silikon lainnya. Misalkan Silikon dimasukkan atom pengotor yang mempunyai elektron valensi 5 (misalnya P, As dan Sb). Hanya 4 elektron

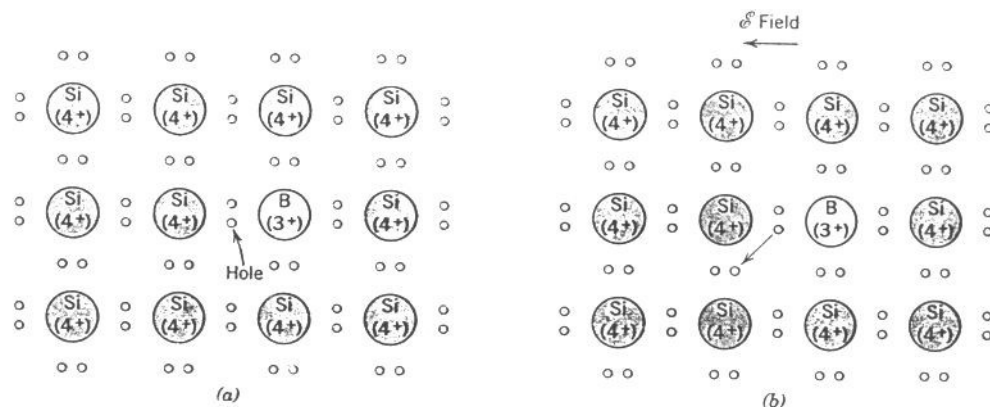
dari atom pengotor ini yang bisa berikatan dengan 4 atom Si, sehingga elektron ke lima menjadi bebas seperti yang ditunjukkan oleh gambar 6a karena energi ikat elektron ini sangatlah kecil. Elektron ini bisa bergerak dengan mudah sehingga elektron ini menjadi elektron konduksi (gambar 5.6b dan 5.6c).

Jumlah elektron pada pita konduksi akan melebihi jumlah hole ($n \gg p$), sehingga rumus konduktivitas listrik menjadi:

$$\sigma \approx n |e| \mu_e$$

Semikonduktor Ekstrinsik Tipe-p

Efek yang berlawanan akan dihasilkan apabila silikon atau germanium mendapat atom pengotor dengan jumlah elektron valensi tiga. Satu dari empat ikatan kovalen pada silikon atau germanium akan kekosongan elektron, dimana kekurangan ini akan ditandai dengan adanya hole. Hole ini akan diisi oleh elektron dari atom yang berdekatan sehingga hole akan berpindah ke tempat elektron yang pindah tersebut berada. Pertukaran posisi elektron dan hole ini ditunjukkan oleh gambar 5.7. Hole yang bergerak dianggap mempunyai keadaan tereksitasi dan akan mengakibatkan proses konduksi.



Gambar 5.7. Model semikonduktor ekstrinsik tipe-p. (a) atom impuritas seperti boron, mempunyai tiga elektron valensi bisa menempati posisi atom silikon. Hal ini akan mengakibatkan kurang satu elektron atau sebuah hole pada atom impuritas tersebut. (b) Pergerakan hole ini karena adanya medan listrik.

Contoh soal

Posfor ditambahkan ke silikon kemurnian tinggi untuk mendapatkan konsentrasi 10^{23} m^{-3} muatan pembawa pada temperatur ruang.

- Apakah material ini jenis n atau p ?
- Hitunglah konduktivitas material ini pada temperatur ruang, dengan mengasumsikan bahwa mobilitas elektron dan hole sama dengan material intrinsik.

Jawab

- a. Posfor adalah unsur group VA dan akan berlaku sebagai donor dalam silikon. Sehingga 10^{23} m^{-3} pembawa muatan semuanya merupakan elektron. Konsentrasi elektron ini lebih besar dari kondisi intrinsik ($1,33 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$); maka material adalah ekstrinsik tipe-*n*.
- b. Dalam hal konduktivitas, dicari dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned}\sigma &= n|e|\mu_e = (10^{23} \text{ m}^{-3})(1,6 \times 10^{-19} \text{ C})(0,14 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}) \\ &= 2240 (\Omega\cdot\text{m})^{-1}\end{aligned}$$

Alat-alat semikonduktor

- p-n junction (diode)
- transistor, mosfet
- dsb.

SIFAT DIELEKTRIK

Material dielektrik adalah bahan yang terisolasi secara listrik dan menunjukkan gejala struktur dipole yaitu pemisahan muatan listrik secara positif dan negatif.

Kapasitansi

Besarnya muatan listrik yang tersimpan pada plat/atau material dielektrik (kapasitor).

Kapasitansi dirumuskan:

$$C = Q / V$$

C = Kapasitas, farad

V = Tegangan, Volt

Q = muatan listrik, coulomb

Kapasitansi bisa dihitung dengan persamaan berikut:

$$C = \epsilon_0 A / L$$

ϵ_0 = permitivitas vacum, $8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

A = luas plat

L = jarak pelat

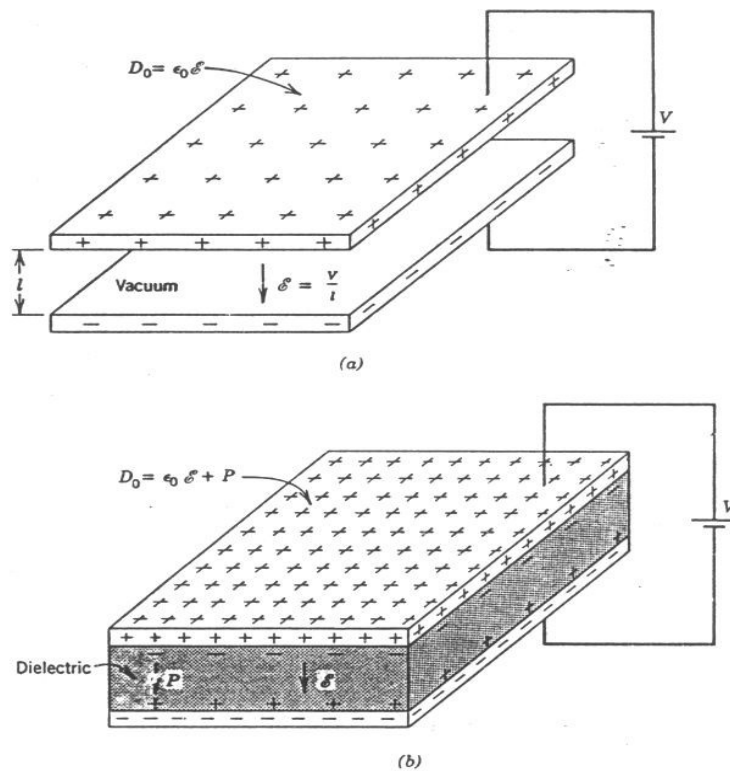
Jika bahan dielektrik dimasukkan diantara pelat maka:

$$C = \epsilon A / L$$

ϵ = Permittivitas bahan dielektrik $> \epsilon_0$

Konstanta dielektrik, ϵ_r :

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 \quad \epsilon_r > 1$$



Gambar 5.8. Kapasitor pelat sejajar (a) jika terdapat vakum dan (b) jika terdapat bahan dielektrik.

Tabel 5.3. Konstanta dielektrik dari beberapa material dielektrik.

Material	Konstanta dielektrik	
	60 Hz	1 MHz
<i>Keramik</i>		
Keramik titanat	-	15-10.000
Mika	-	5,4 – 8,7
Steatite (MgO-SiO ₂)	-	5,5 – 7,5
Gelas soda-lime	6,9	6,9
Poselen	6,0	6,0
Fused silica	4,0	3,8
<i>Polimer</i>		
Phenol-formaldehyde	5,3	4,8
Nylon 6,6	4,0	3,6
Polystyrene	2,6	2,6
Poly ethylene	2,3	2,3
Polytetrafluoroethylene	2,1	2,1

Soal-soal

1. a. Hitunglah konduktivitas listrik spesimen silikon berbentuk silinder dengan diameter 7,0 mm dan panjang 57 mm dimana arus sebesar 0,25 A mengalir pada arah sumbunya. Tegangan 24 V terukur pada kedua sensor yang berjarak 45 mm.
b. Hitunglah tahanan spesimen sepanjang 57 mm panjangnya.
2. Sebuah kawat tembaga dengan panjang 100 m mengalami jatuh tegangan kurang dari 1,5 V jika arus sebesar 2,5 A melaluinya. Dengan menggunakan data dari tabel 1, hitunglah diameter minimum dari kawat.
3. Sebuah kawat aluminium dengan diameter 4 mm dinyatakan mempunyai tahanan tidak lebih dari 2,5 Ω . Dengan menggunakan data dari tabel 1, hitunglah panjang kawat maksimum.
4. Apakah perbedaan antara konduksi elektronik dengan konduksi ion?
5. Berdasarkan struktur pita energi, jelaskan alasannya perbedaan konduktivitas listrik antara logam, semikonduktor, dan isolator.
6. Sebuah bahan semikonduktor tipe-*n* diketahui mempunyai konsentrasi elektron sebesar $5 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$. Jika kecepatan hanyut elektron 350 m/s di dalam medan listrik 1000 V/m, hitunglah konduktivitas material ini.
7. Muatan sebesar $2,0 \times 10^{-10}$ tersimpan pada masing-masing pelat dari kapasitor pelat-paralel yang mempunyai luas penampang 650 mm² dan jarak pelat 4,0 mm.
 - a. Berapakah tegangan yang diperlukan jika material mempunyai konstanta dielektrik 3,5?
 - b. Berapakah tegangan yang diperlukan jika menggunakan kondisi vakum?
 - c. Hitunglah perpindahan dielektrik untuk a).
 - d. Hitunglah polarisasi untuk a).

BAB VI

SIFAT TERMAL

Sifat termal adalah respon material terhadap panas. Ketika bahan padat menyerap energi panas maka temperaturnya akan naik dan dimensinya bertambah.

Kapasitas panas/kalor, C adalah kemampuan material untuk menyerap energi panas dari lingkungannya, atau sejumlah energi yang dibutuhkan untuk menaikkan 1 unit temperatur.

$$C = dQ/dT$$

C = kapasitas panas / kalor

dQ = energi yang dibutuhkan

dT = kenaikan temperatur

Satuan C : J/Mol-K, Cal/Mol-K

C_v = kapasitas kalor pada volume konstan

C_p = kapasitas kalor pada tekanan konstan

Kalor Spesifik

Yang dimaksud dengan kalor spesifik adalah kapasitas kalor per satuan massa.

Satuan kalor spesifik: J/kg-K, Cal/g-K, BTU/lbm^oF

Pada bahan padat penyerapan energi panas akan meningkatkan energi vibrasi/getar atom disebut juga phonon.

Ekspansi Termal

Bahan padat akan berekspansi ketika dipanaskan dan menciut ketika didinginkan

$$\frac{l_f - l_0}{l_0} = \alpha_1 (T_f - T_0)$$

atau:

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha_1 \Delta T$$

l_f = panjang akhir

l_0 = panjang awal

α_1 = koefisien muai termal linier

T_f = temperatur akhir

T_0 = temperatur awal

Tabel 6.1. Tabulasi sifat termal dari berbagai bahan.

<i>Material</i>	c_p (J/kg-K) ^a	α_1 [(°C) ⁻¹ × 10 ⁻⁶] ^b	k (W/m-K) ^c	L [Ω-W/(K) ² × 10 ⁻⁵]
<i>Metals</i>				
Aluminum	900	23.6	247	2.20
Copper	386	17.0	398	2.25
Gold	128	14.2	315	2.50
Iron	448	11.8	80	2.71
Nickel	443	13.3	90	2.08
Silver	235	19.7	428	2.13
Tungsten	138	4.5	178	3.20
1025 Steel	486	12.0	51.9	—
316 Stainless steel	502	16.0	15.9	—
Brass (70Cu-30Zn)	375	20.0	120	—
Kovar (54Fe-29Ni-17Co)	460	5.1	17	2.80
Invar (64Fe-36Ni)	500	1.6	10	2.75
Super Invar (63Fe-32Ni-5Co)	500	0.72	10	2.68
<i>Ceramics</i>				
Alumina (Al ₂ O ₃)	775	7.6	39	—
Magnesia (MgO)	940	13.5 ^d	37.7	—
Spinel (Mg-Al ₂ O ₄)	790	7.6 ^d	15.0 ^e	—
Fused silica (SiO ₂)	740	0.4	1.4	—
Soda-lime glass	840	9.0	1.7	—
Borosilicate (Pyrex) glass	850	3.3	1.4	—
<i>Polymers</i>				
Polyethylene (high density)	1850	106–198	0.46–0.50	—
Polypropylene	1925	145–180	0.12	—
Polystyrene	1170	90–150	0.13	—
Polytetrafluoroethylene (Teflon)	1050	126–216	0.25	—
Phenol-formaldehyde, phenolic (Bakelite)	1590–1760	122	0.15	—
Nylon 6,6	1670	144	0.24	—
Polyisoprene	—	220	0.14	—

^a To convert to cal/g-K, multiply by 2.39 × 10⁻⁴; to convert to Btu/lb_m-°F, multiply by 2.39 × 10⁻⁴.

^b To convert to (°F)⁻¹, multiply by 0.56.

^c To convert to cal/s-cm-K, multiply by 2.39 × 10⁻³; to convert to Btu/ft-h-°F, multiply by 0.578.

^d Value measured at 100°C.

^e Mean value taken over the temperature range 0–1000°C.

Perubahan Volume Karena Perubahan Temperatur,

dirumuskan:

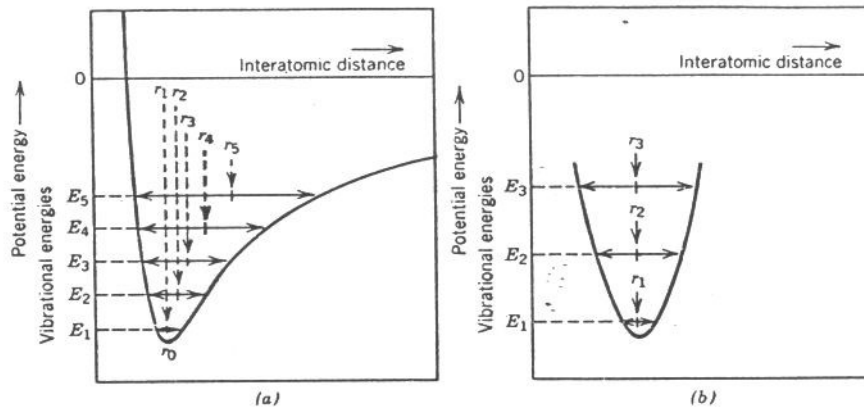
$$\Delta V / V_0 = \alpha_v \Delta t$$

ΔV = perubahan volume

α_v = koefisien muai termal volume

V_0 = volume awal

Pada skala atom, ekspansi termal merupakan kenaikan jarak rata-rata antar atom. Gambar berikut adalah gambar energi potensial vs jarak antar atom.



Gambar 6.3. (a) Plot energi potensial vs jarak antar atom, menunjukkan kenaikan jarak antar atom dengan kenaikan temperatur. Karena pemanasan, jarak antar atom naik dari r_0 ke r_1 ke r_2 , dan seterusnya. (b) Untuk kurva energi potensial simetrik vs jarak antar atom, tidak ada kenaikan jarak antar atom karena kenaikan temperatur ($r_1 = r_2 = r_3$).

Pada logam, koefisien muai termal linier berada pada daerah 5×10^{-6} s/d $25 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}$

Konduktivitas Termal

Konduksi termal adalah fenomena di mana kalor/panas dipindahkan dari temperatur tinggi ke temperatur rendah pada suatu zat/benda. Secara matematik:

$$q = -k dT / dx$$

q = fluks kalor / laju kalor, W/m²(BTU/ft²-h)

k = konduktivitas termal, W/m-K (BTU/ft-h-°F)

dT / dK = gradien temperatur terhadap media

Tanda negatif pada persamaan menunjukkan arah aliran kalor adalah dari panas ke dingin. Panas dipindahkan pada material adalah karena gelombang vibrasi kisi (phonon) dan elektron bebas

- pada logam: konduksi termal dominan karena elektron bebas.
- phonon sangat dominan pada konduksi termal keramik.
- pada polimer: besarnya konduktivitas termal tergantung derajat kristalisasi. polimer yang mempunyai drajat kristalisasi tinggi akan mempunyai konduktivitas termal lebih tinggi.

Tegangan Termal

Tegangan termal diakibatkan karena perubahan temperatur. Tegangan termal bisa mengakibatkan patah atau deformasi plastis yang tak diinginkan. Secara matematik:

$$\sigma = E \alpha_1 (T_0 - T_f) = E \alpha_1 \Delta T$$

σ = tegangan termal

E = modulus elastisitas

pada $T_f > T_0$ = tegangan kompresi ($\sigma < 0$)

pada $T_f < T_0$ = tegangan tarik ($\sigma > 0$)

Contoh soal

Sebuah kuningan (brass) batangan digunakan untuk aplikasi yang mengharuskan ujungnya kaku. Jika batang adalah bebas tegangan pada temperatur ruang (20° C), Berapakah temperatur maksimum dimana batang dapat dipanaskan tanpa melampaui tegangan tekan 172 MPa? Asumsikan modulus elastisitas kuningan 100 Gpa.

Jawab

Diketahui: -172 MPa (tekan); $T_0 = 20^0$ C; $\alpha_1 = 20,0 \times 10^{-6}$ (tabel 1)

Temperatur akhir, T_f :

$$\begin{aligned} T_f &= T_0 - \frac{\sigma}{E \alpha_1} \\ &= 20^{\circ} - \frac{-172 \text{ MPa}}{(100 \times 10^3 \text{ MPa}) [20 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}]} \\ &= 20^{\circ} \text{ C} + 86^{\circ} \text{ C} = 106^{\circ} \text{ C} \end{aligned}$$

Soal-soal

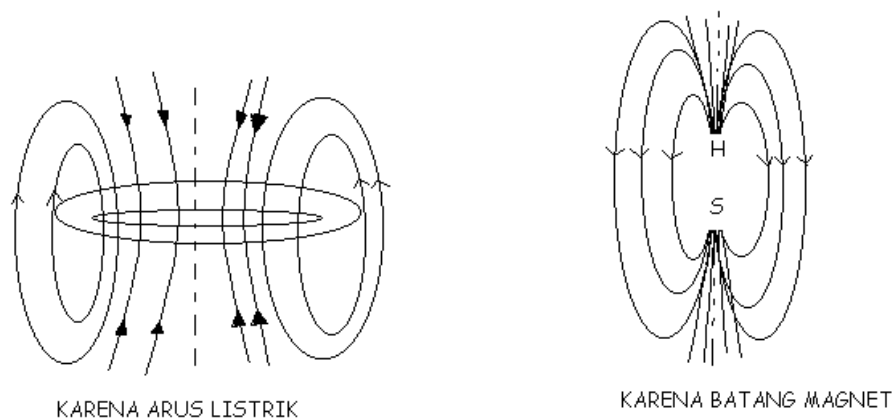
1. Perkirakanlah energi yang diperlukan untuk menaikkan tempertatur 5 kg material berikut in dari 20°C ke 150°C : aluminium, kuninan (brass) alumina, dan polyprophylene.
2. a. Tentukanlah kapasitas kalor pada tekanan konstan pada temperatur ruang dari material-material berikut: aluminium, perak (silver), tungsten, dan kuningan (brass) 70Cu-30Zn.
b. Bagaimana perbandingan harga-harga tersebut satu sama lain? Jelaskan.
3. Kawat tembaa dengan panjang 15 m didinginkan dari temperatur 40°C ke -9°C . Berapakah besar perubahan panjang yang terjadi?
4. Sebuah batang logam panjang 0,4 m mengalami perpanjangan sebesar 0,48 mm ketika dipanaskan dari 20 ke 100°C . carilah harga koefisien muai termal linier material ini.
5. Sebuah bilah bimetal dibuat dari dua bilah logam yang berbeda yang terikat di sepanjang bilahnya. Jelaskan kenapa alat ini dapat digunakan sebagai *thermostat* untuk mengatur temperatur?

BAB VII

SIFAT MAGNET

Sifat magnet banyak dipergunakan pada alat-alat : generator pembangkit listrik, motor listrik, radio, televisi, telepon, komputer, dan sistem reproduksi suara dan video.

Kutub magnet dibangkitkan oleh gerakan partikel bermuatan listrik. Gaya magnetik kadang-kadang disebut juga medan magnet.



Gambar 7.1. Garis medan magnet di sekeliling arus listrik dan batang magnet.

Magnetic dipole (dipol magnet) digambarkan sebagai sebuah batang magnet yang mempunyai kutub utara dan selatan. Magnetik dipole bisa juga digambarkan dengan tanda panah.



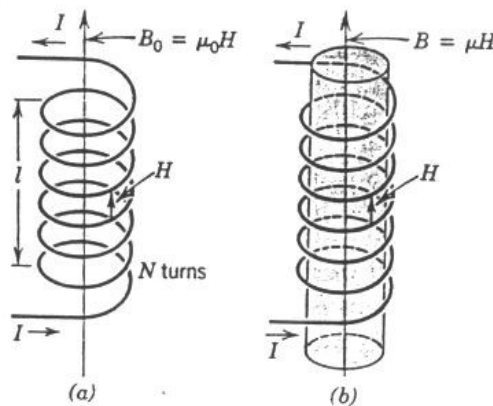
Gambar 7.2. Momen magnet ditunjukkan oleh tanda panah. (N = north/utara, S = south/selatan).

Kekuatan medan Magnet, H

Kekuatan medan magnet H , adalah medan magnet yang diperoleh dari eksternal. Jika medan magnet dihasilkan oleh koil silinder (atau solenoid) yang terdiri dari N gulungan rapat, dengan panjang l , dan mengalirkan arus I maka berlaku:

$$H = \frac{N \cdot I}{l}$$

H dalam Ampere Putar/m Atau Ampere/m



Gambar 7.3. (a) Medan magnet H dibangkitkan oleh koil silinder yang bergantung pada arus I , jumlah gulungan N , panjang koil l . Kerapatan fluks magnet B_0 pada daerah vakum sama dengan $\mu_0 H$, dimana μ_0 adalah permeabilitas vakum, $4\pi \times 10^{-7}$ H/m. (b) Kerapatan fluks magnet di dalam bahan padat sama dengan μH , dimana μ adalah permeabilitas dari bahan padat.

Induksi Magnetik atau Kerapatan Fluks Magnetik, (B)

Induksi magnetik atau kerapatan fluks magnetik adalah jumlah besarnya kekuatan medan internal karena pengaruh medan magnet, H .

$$B = \mu H$$

μ = permeabilitas, weber/ ampermeter, Wb/A

Pada keadaan vakum:

$$B_0 = \mu_0 H$$

Dimana: $\mu_0 H$ = permeabilitas vakum = $4\pi \times 10^{-7} = 1,257 \times 10^{-6}$ H/m

Beberapa parameter bisa digunakan untuk menerangkan sifat magnet bahan padat. Satu daripadanya adalah permeabilitas bahan terhadap permeabilitas vakum, atau:

$$\mu_r = \mu / \mu_0$$

dimana: μ_r = permabilitas relatif

Magnetisasi, M :

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M$$

Karena medan H , momen magnetik pada bahan cenderung menjadi lurus dengan medan dan kemudian diperkuat dengan medan magnet sebesar $\mu_0 M$. Besarnya M sebanding dengan medan yang diberikan sebesar:

$$M = \chi_m H$$

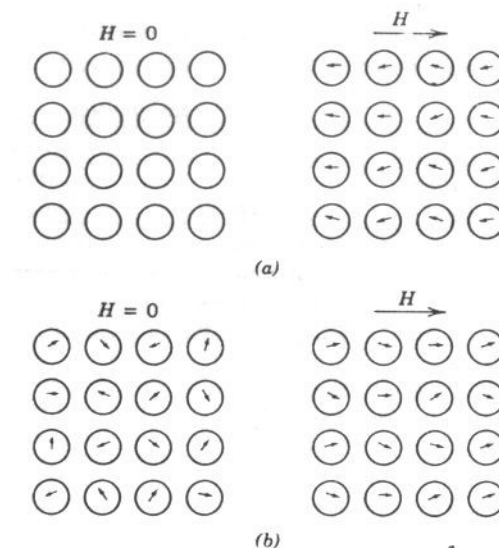
$$\chi_m = \mu_r - 1$$

χ_m =susceptibility magnet

Diamagnetik dan *paramagnetik*: adalah material yang non-magnetik karena hanya menunjukkan sifat magnet ketika ada medan magnet dari luar.

Diamagnetik : bahan yang bentuk magnetnya paling lemah dan tidak permanen. magnet timbul hanya jika ada medan magnet dari luar

Paramagnetik : material yang mempunyai momen dipole permanen namun orientasinya random/acak. Orientasi dipole akan searah jika ada medan magnet dari luar.



Gambar 7.5. (a) konfigurasi dipol atom untuk material diamagnetik dengan dan tanpa medan magnet. Ketika tidak ada medan magnet, tidak ada dipol yang terbentuk; ketika terdapat medan

magnet, dipole searah dengan arah yang berlawanan dengan arah medan. (b) konfigurasi dipol atom dengan dan tanpa medan magnet eksternal untuk material paramagnetik.

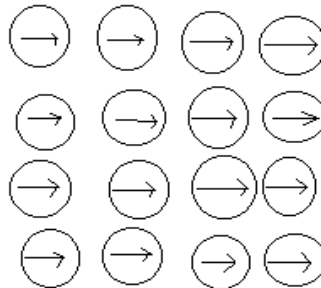
Tabel 7.2. Susceptibility magnet pada temperatur ruang untuk material diamagnetik dan paramagnetik.

Diamagnetik		Paramagnetik	
Material	Susceptibility χ_m (volume) (SI unit)	Material	Susceptibility χ_m (volume) (SI unit)
Aluminium oksida	$-1,81 \times 10^{-5}$	Aluminium	$2,07 \times 10^{-5}$
Tembaga	$-0,96 \times 10^{-5}$	Chromium	$3,13 \times 10^{-4}$
Emas	$-3,44 \times 10^{-5}$	Chromium klorida	$1,51 \times 10^{-3}$
Raksa	$-2,85 \times 10^{-5}$	Manganese sulfata	$3,70 \times 10^{-3}$
Silikon	$-0,41 \times 10^{-5}$	Molybdenum	$1,19 \times 10^{-4}$
Perak	$-2,38 \times 10^{-5}$	Sodium	$8,48 \times 10^{-6}$
Sodium klorida	$-1,41 \times 10^{-5}$	Titanium	$1,81 \times 10^{-4}$
Seng	$-1,56 \times 10^{-5}$	Zirconium	$1,09 \times 10^{-4}$

Feromagnetik : material yang mempunyai momen magnetik yang permanen tanpa adanya medan magnet eksternal. Banyak dijumpai pada logam.

$$H \ll M \Rightarrow B \approx \mu_0 M$$

H=0



Gambar 7.7. Ilustrasi skematik dipol atom yang searah untuk bahan feromagnetik, yang timbul walau tidak ada medan magnet dari luar.

Logam yang mempunyai sifat ini adalah : besi, cobalt, nikel, gadolinium (Gd).

Soal-soal

1. Sebuah gulungan (coil) kawat dengan panjang 0,25 m dan jumlah gulungan 400 dialiri arus listrik sebesar 15 A.
 - a. Berapakah besarnya kekuatan medan magnet H ?
 - b. Hitunglah kerapatan fluks B jika gulungan berada di daerah vakum.
 - c. Hitunglah kerapatan fluks di dalam batang chromium yang diletakkan di dalam gulungan tersebut. Susceptibilitas chromium dapat dilihat pada tabel 2.
2.
 - a. Jelaskan dua sumber momen magnetik bagi elektron.
 - b. Apakah semua elektron mempunyai momen magnetik netto? Mengapa?
 - c. Apakah semua atom mempunyai momen magnetik netto? Mengapa?
3. Kerapatan fluks magnetik di dalam sebuah batang suatu material adalah 0,435 tesla pada medan $H 3,44 \times 10^5$ A/m. Hitunglah :
 - a. Permeabilitas magnetik.
 - b. Jenis magnetisme apakah yang anda harapkan diperlihatkan oleh bahan ini? Mengapa?
4. Ada kaitan pada setiap atom pada material para magnetik dan ferromagnetik dengan momen magnetik netto. Jelaskan mengapa material ferromagnetik dapat dijadikan magnet permanen sedangkan material paramagnetik tidak.
5. Sebutkan persamaan dan perbedaan utama antara material ferromagnetik dan material ferrimagnetik.

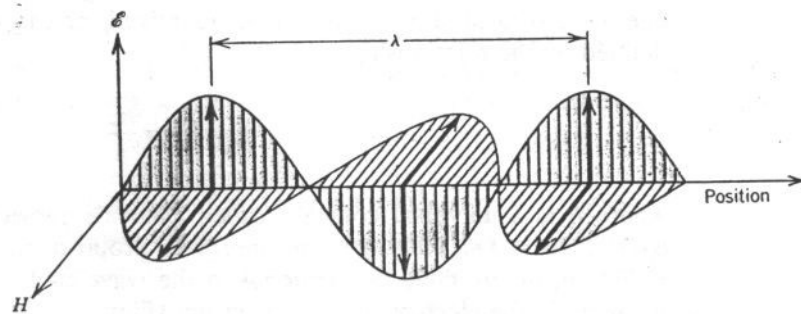
BAB VIII

SIFAT OPTIK

Sifat optik adalah respon material terhadap radiasi elektromagnetik khususnya cahaya tampak.

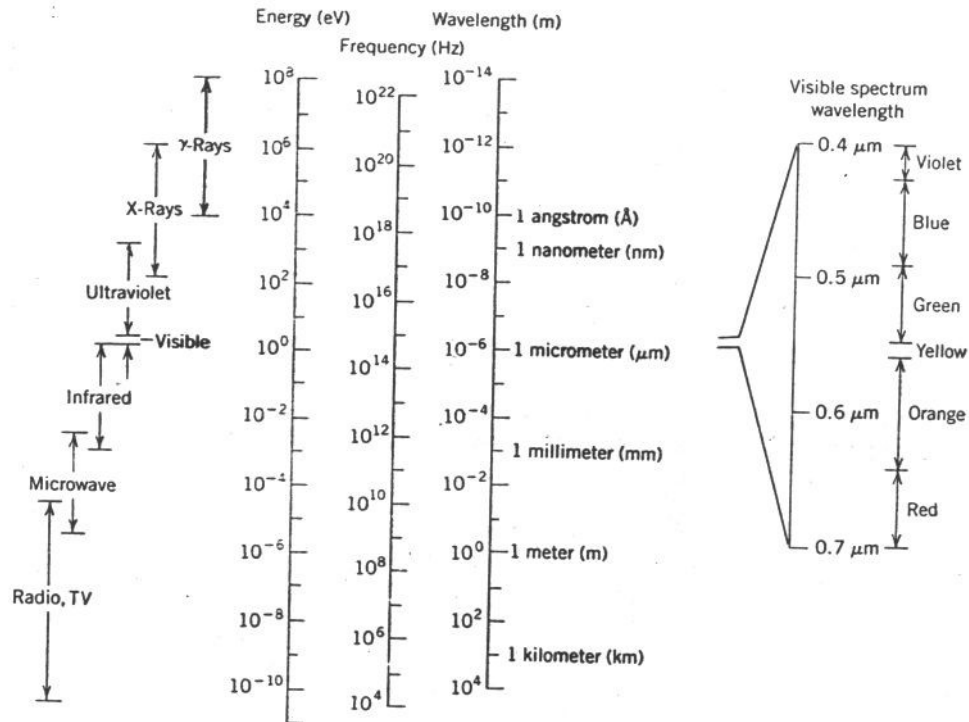
Radiasi Elektromagnetik

Bentuk radiasi elektromagnetik adalah gelombang yang terdiri dari medan listrik dan medan magnet yang saling tegak lurus.



Gambar 8.1. Gelombang elektromagnetik yang menunjukkan medan listrik E dan medan magnet H , dan panjang gelombang λ .

Cahaya tampak (visible light) mempunyai $\lambda = 0,4 \mu\text{m}$ s/d $0,7 \mu\text{m}$. Warna yang terlihat ditentukan oleh panjang gelombang.



Gambar 8.2. Spektrum radiasi elektromagnetik, termasuk jangkauan panjang gelombang untuk berbagai warna cahaya tampak.

Kecepatan radiasi elektromagnetik pada ruang hampa adalah, $C = 3 \times 10^8$ m/s, dirumuskan:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

$$c = \lambda \nu$$

ϵ_0 = permitivitas listrik pada ruang hampa

μ_0 = permeabilitas magnet pada ruang hampa

ν = frekuensi, hz

Energi radiasi gelombang elektromagnetik atau energi photon, E :

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

$h = \text{konstanta planck} = 6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}$

Jika cahaya merambat pada suatu media kemedua lainnya maka terjadi beberapa peristiwa, sebagian cahaya akan ditransmisikan, sebagian diabsorpsi oleh media dan sebagian lain dipantulkan pada batas permukaan kedua media.

$$I_o = I_T + I_A + I_R$$

atau

$$T + A + R = 1$$

I_o = intensitas cahaya datang

I_T = intensitas cahaya yang ditransmisikan

I_A = intensitas cahaya yang diabsorpsi

I_R = intensitas cahaya yang dipantulkan

T = transmisivitas = I_T/I_o

A = absorptivitas = I_A/I_o

R = reflektivitas = I_R/I_o

Material transparan : material yang mampu meneruskan cahaya dengan sedikit absorpsi dan refleksi.

Translucent material : adalah material yang mentransmisikan cahaya secara diffuse (terurai) yaitu cahaya yang betebaran didalam media. Jika ada benda dibelakangnya maka benda tersebut terlihat kabur.

opaque : material yang tidak bisa mentransmisikan cahaya tampak.

Sifat Optik Logam

Semua cahaya tampak tidak bisa ditransmisikan oleh logam , sehingga logam adalah opaque.

Sebagian besar cahaya tampak akan dipantulkan kembali ke udara, hanya sebagian kecil yang diserap. Warna logam tergantung dari panjang gelombang yang dipantulkan .

Sifat Optik Non-logam

Material non-logam bisa bersifat transparan, maka disamping absorpsi dan refleksi, refraksi, dan transmisi juga merupakan fenomena yang terjadi.

Refraksi

Refraksi adalah penurunan kecepatan gelombang cahaya tampak yang ditransmisikan didalam suatu media.

indeks refraksi (n) : rasio kecepatan pada ruang hampa, C terhadap kecepatan pada media, v :

$$n = C / v$$

Harga n dipengaruhi oleh panjang gelombang.

Tabel 8.1. Indeks refraksi beberapa material transparan.

Material	Indeks Refraksi rata-rata
Keramik	
Gelas silika	1,458
Gelas Borosilcate (Pyrex)	1,47
Gelas soda-lime	1,51
Kuarsa (SiO_2)	1,55
Gelas optik kerapatan tinggi	1,65
Spinel (MgAl_2O_4)	1,72
Periclase (MgO)	1,74
Corundum (Al_2O_3)	1,76
Polimer	
Polytetrafluoroethylene	1,35
Polymethyl methacrylate	1,49
Polypropylene	1,49
Polyethylene	1,51
Polystyrene	1,60

Soal-soal

1. Diskusikanlah persamaan dan perbedaan antara photon dan phonon.
2. Cahaya tampak dengan panjang gelombang 5×10^{-7} muncul sebagai warna hijau. Hitunglah frekuensi dan energi photon cahaya ini.
3. Jelaskan perbedaan antara material *opaque*, *translucent*, dan transparan dalam hal penampakkannya dan transmitansi cahayanya.
4. a. terangkan dengan singkat fenomena polarisasi elektronik oleh radiasi elektromagnetik.
b. Sebutkan dua konsekuensi polarisasi elektronik pada material transparan.
5. a. Terangkan kenapa logam bersifat opaque terhadap radiasi elektromagnetik yang mempunyai energi photon dalam daerah cahaya tampak dari spektrum cahaya.
b. Mengapa logam transparan terhadap frekuensi tinggi sinar-x dan radiasi sinar- γ ?
6. Bisakah material mempunyai indeks refraksi kurang dari satu? Mengapa?
7. Hitunglah kecepatan cahaya di dalam Calsium Fluorida (CaF_2) yang mempunyai konstanta dielektrik ϵ_r 2,056 (pada frekuensi cahaya tampak) dan susceptibilitas $-1,43 \times 10^{-5}$.
8. Jelaskan dengan ringkas tiga mekanisme absorpsi pada material non-logam.
9. Jelaskan dengan ringkas mengapa beberapa material transparan menampakkan warna sedang yang lainnya tidak berwarna.
10. Jelaskan dengan ringkas fenomena dispersi pada media transparan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Askeland D.R., *The Science and Engineering Material*. Chapman & Hall.
2. Avner S.H., *Introduction to Physical Metallurgy, 2nd edition*, McGraw-Hill Book Company.
3. Callister W.D. Jr, *Materials Science and Engineering. 4th edition*, John Wiley & Sons, Inc., 1997.
4. Vlack L.H.Van, terj. Sriati Djaprie, *Elemen-elemen Ilmu dan Rekayasa Material*, Erlangga, 2004.