

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Aki

Accumulator atau sering disebut aki, adalah salah satu komponen utama dalam kendaraan bermotor, baik mobil atau motor, semua memerlukan aki untuk dapat menghidupkan mesin mobil (mencatu arus pada dinamo stater kendaraan). Aki mampu mengubah tenaga kimia menjadi tenaga listrik. Di pasaran saat ini sangat beragam jumlah dan jenis aki yang dapat ditemui. Aki untuk mobil biasanya mempunyai tegangan sebesar 12 Volt, sedangkan untuk motor ada tiga jenis yaitu, dengan tegangan 12 Volt, 9 volt dan ada juga yang bertegangan 6 Volt. Selain itu juga dapat ditemukan pula aki yang khusus untuk menyalakan tape atau radio dengan tegangan juga yang dapat diatur dengan rentang 3, 6, 9, dan 12 Volt. Tentu saja aki jenis ini dapat dimuati kembali (*recharge*) apabila muatannya telah berkurang atau habis. Dikenal dua jenis elemen yang merupakan sumber arus searah (DC) dari proses kimiawi, yaitu elemen primer dan elemen sekunder. Elemen primer terdiri dari elemen basah dan elemen kering. Reaksi kimia pada elemen primer yang menyebabkan elektron mengalir dari elektroda negatif (*katoda*) ke elektroda positif (*anoda*) tidak dapat dibalik arahnya. Maka jika muatannya habis, maka elemen primer tidak dapat dimuati kembali dan memerlukan penggantian bahan pereaksinya (elemen kering). Sehingga dilihat dari sisi ekonomis elemen primer dapat dikatakan cukup boros. Contoh elemen primer adalah batu baterai (*dry cells*).

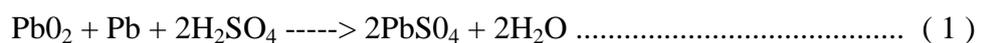
Allesandro Volta, seorang ilmuwan fisika mengetahui, gaya gerak listrik (ggl) dapat dibangkitkan dua logam yang berbeda dan dipisahkan larutan elektrolit. Volta mendapatkan pasangan logam tembaga (Cu) dan seng (Zn) dapat membangkitkan ggl yang lebih besar dibandingkan pasangan logam lainnya (kelak disebut elemen Volta). Hal ini menjadi prinsip dasar bagi pembuatan dan penggunaan elemen sekunder. Elemen sekunder harus diberi muatan terlebih dahulu sebelum digunakan, yaitu dengan cara mengalirkan arus listrik melaluinya (secara umum dikenal dengan istilah disetrum). Akan tetapi, tidak seperti elemen primer, elemen sekunder dapat dimuati kembali

berulang kali. Elemen sekunder ini lebih dikenal dengan aki. Dalam sebuah aki berlangsung proses elektrokimia yang reversibel (bolak-balik) dengan efisiensi yang tinggi. Yang dimaksud dengan proses elektrokimia reversibel yaitu di dalam aki saat dipakai berlangsung proses perubahan kimia menjadi tenaga listrik (*discharging*). Sedangkan saat diisi atau dimuati, terjadi proses tenaga listrik menjadi tenaga kimia (*charging*).

Jenis aki yang umum digunakan adalah *accumulator* timbal. Secara fisik aki ini terdiri dari dua kumpulan pelat yang dimasukkan pada larutan asam sulfat encer (H_2SO_4). Larutan elektrolit itu ditempatkan pada wadah atau bejana aki yang terbuat dari bahan ebonit atau gelas. Kedua belah pelat terbuat dari timbal (Pb), dan ketika pertama kali dimuati maka akan terbentuk lapisan timbal dioksida (PbO_2) pada pelat positif. Letak pelat positif dan negatif sangat berdekatan tetapi dibuat untuk tidak saling menyentuh dengan adanya lapisan pemisah yang berfungsi sebagai isolator (bahan penyekat). [Ref.7 hal. 1-2]

2.1.1 Reaksi Kimia

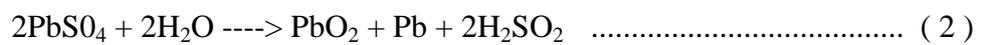
Pada saat aki digunakan, tiap molekul asam sulfat (H_2SO_4) pecah menjadi dua ion hidrogen yang bermuatan positif ($2H^+$) dan ion sulfat yang bermuatan negatif (SO_4^-). Tiap ion SO_4^- yang berada dekat lempeng Pb akan bersatu dengan satu atom timbal murni (Pb) menjadi timbal sulfat ($PbSO_4$) sambil melepaskan dua elektron. Sedang sepasang ion hidrogen tadi akan ditarik lempeng timbal dioksida (PbO_2), mengambil dua elektron dan bersatu dengan satu atom oksigen membentuk molekul air (H_2O). Dari proses ini terjadi pengambilan elektron dari timbal dioksida (sehingga menjadi positif) dan memberikan elektron itu pada timbal murni (sehingga menjadi negatif), yang mengakibatkan adanya beda potensial listrik di antara dua kutub tersebut. Proses tersebut terjadi secara simultan, reaksi secara kimia dinyatakan sebagai berikut :



Di atas ditunjukkan terbentuknya timbal sulfat selama penggunaan (*discharging*). Keadaan ini akan mengurangi reaktivitas dari cairan elektrolit karena asamnya menjadi lemah (encer), sehingga tahanan antara kutub sangat lemah untuk pemakaian praktis. Sementara proses kimia selama pengisian aki (*charging*) terjadi

setelah aki melemah (tidak dapat memasok arus listrik pada saat kendaraan hendak dihidupkan). Kondisi aki dapat dikembalikan pada keadaan semula dengan memberikan arus listrik yang arahnya berlawanan dengan arus yang terjadi saat *discharging*. Pada proses ini, tiap molekul air terurai dan tiap pasang ion hidrogen yang dekat dengan lempeng negatif bersatu dengan ion SO_4 pada lempeng negatif membentuk molekul asam sulfat. Sedangkan ion oksigen yang bebas bersatu dengan tiap atom Pb pada lempeng positif membentuk PbO_2 . [Ref.7 hal. 2]

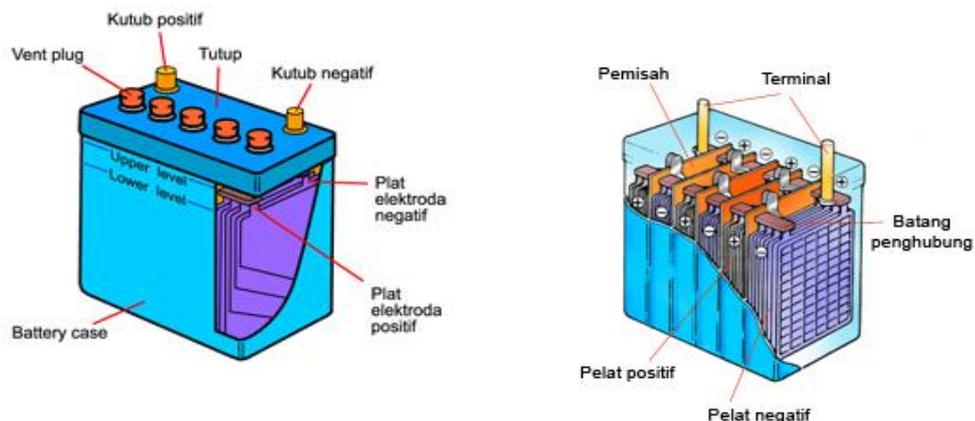
Reaksi kimia yang terjadi adalah :



2.1.2 Macam dan Cara Kerja Aki

Aki yang ada di pasaran ada 2 jenis yaitu aki basah dan aki kering. Aki basah media penyimpanan arus listrik ini merupakan jenis paling umum digunakan. Aki jenis ini masih perlu diberi air aki yang dikenal dengan sebutan *accu zuur*. Sedangkan aki kering merupakan jenis aki yang tidak memakai cairan, mirip seperti baterai telepon selular. Aki ini tahan terhadap getaran dan suhu rendah (gambar 2.1).

Dalam aki terdapat elemen dan sel untuk menyimpan arus yang mengandung asam sulfat (H_2SO_4). Tiap sel berisikan pelat positif dan pelat negatif. Pada pelat positif terkandung oksid timbal coklat (PbO_2), sedangkan pelat negatif mengandung timbal (Pb). Pelat-pelat ditempatkan pada batang penghubung. Pemisah atau *separator* menjadi isolasi diantara pelat itu, dibuat agar baterai acid mudah beredar disekeliling pelat. Bila ketiga unsur kimia ini berinteraksi, muncullah arus listrik.



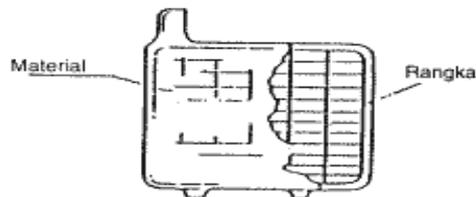
Gambar 2.1 Sel Aki

Aki memiliki 2 kutub/terminal, kutub positif dan kutub negatif . Biasanya kutub positif (+) lebih besar atau lebih tebal dari kutub negatif (-), untuk menghindari kelalaian bila aki hendak dihubungkan dengan kabel-kabelnya. Pada aki terdapat batas minimum dan maksimum tinggi permukaan air aki untuk masing-masing sel. Bila permukaan air aki di bawah level minimum akan merusak fungsi sel aki. Jika air aki melebihi level maksimum, mengakibatkan air aki menjadi panas dan meluap keluar melalui tutup sel. [Ref.7 hal. 3]

2.1.3 Konstruksi Aki

1. Plat positif dan negatif

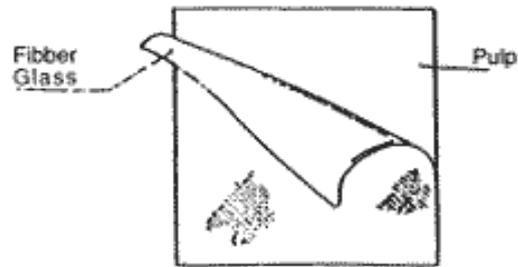
Plat positif dan plat negatif merupakan komponen utama suatu aki. Kualitas plat sangat menentukan kualitas suatu aki, plat-plat tersebut terdiri dari rangka yang terbuat dari paduan timbal antimon yang di isi dengan suatu bahan aktif. Bahan aktif pada plat positif adalah timbal peroksida yang berwarna coklat, sedang pada plat negatif adalah spons - timbal yang berwarna abu abu (gambar 2.2).



Gambar 2.2 Plat Sel Aki

2. Separator dan lapisan serat gelas

Antara plat positif dan plat negatif disisipkan lembaran separator yang terbuat dari serat *cellulosa* yang diperkuat dengan resin. Lembaran lapisan serat gelas dipakai untuk melindungi bahan aktif dari plat positif, karena timbal peroksida mempunyai daya kohesi yang lebih rendah dan mudah rontok jika dibandingkan dengan bahan aktif dari plat negatif. Jadi fungsi lapisan serat gelas disini adalah untuk memperpanjang umur plat positif agar dapat mengimbangi plat negatif, selain itu lapisan serat gelas juga berfungsi melindungi separator (gambar 2.3).



Gambar 2.3 Lapisan Serat Gelas

3. Elektrolit

Cairan elektrolit yang dipakai untuk mengisi aki adalah larutan encer asam sulfat yang tidak berwarna dan tidak berbau. Elektrolit ini cukup kuat untuk merusak pakaian. Untuk cairan pengisi aki dipakai elektrolit dengan berat jenis 1.260 pada 20° C.

4. Penghubung antara sel dan terminal

Aki 12 volt mempunyai 6 sel, sedang Aki 6 volt mempunyai 3 sel. Sel merupakan unit dasar suatu Aki dengan tegangan sebesar 2 volt. Penghubung sel (*conector*) menghubungkan sel sel secara seri. Penghubung sel ini terbuat dari paduan timbal antimon. Ada dua cara penghubung sel - sel tersebut. Yang pertama melalui atas dinding penyekat dan yang kedua melalui (menembus) dinding penyekat. Terminal terdapat pada kedua sel ujung (pinggir), satu bertanda positif (+) dan yang lain negatif (-). Melalui kedua terminal ini listrik dialirkan penghubung antara sel dan terminal

5. Sumbat

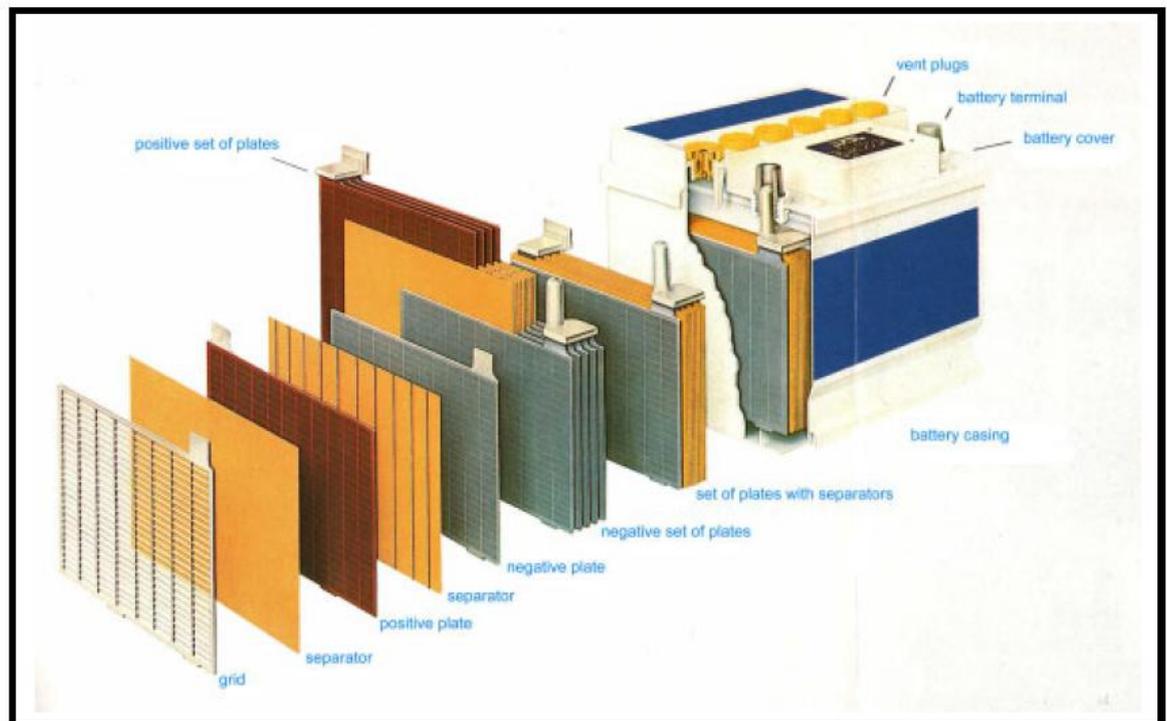
Sumbat dipasang pada lubang untuk mengisi elektrolit pada tutup aki, biasanya terbuat dari plastik. Sumbat pada Aki motor tidak mempunyai lubang udara. Gas yang terbentuk dalam Aki disalurkan melalui slang plastik/ karet. Uap asam akan tertahan pada ruang kecil pada tutup aki, kemudian asamnya dikembalikan kedalam sel.

6. Perekat bak dan tutup

Ada dua cara untuk menutup aki, yang pertama menggunakan bahan perekat lem, dan yang kedua dengan bantuan panas (*Heat Sealing*). Yang pertama untuk bak *polystyrene* sedang yang kedua untuk bak *polipropylene*. [Ref.8 hal. 1-2]

2.1.4 Komposisi Kimia Aki

Aki kendaraan bermotor modern memiliki komposisi antara lain boks PP (*polypropylen*), *plate (grid dan paste)*, kutub (*poles*), penghubung (*bridges*) dan separator PP sebagai penyekat antara plat positif dan negatif (gambar 2.4). *Paste* terdiri dari Pb, PbO₂ dan PbSO₄. Tipe aki kendaraan bermotor yang lama memiliki boks yang terbuat dari karet keras serta separator PVC (*polyvinylchloride*) dan PP selain boks.



Gambar 2.4 Desain Baterai Starter

Komposisi material dari aki beragam tergantung pada tipe aki, ukuran dan desainnya. Gambar 2.5 memperlihatkan perbedaan komposisi dari tipe aki lama dengan aki modern. Komponen dari aki yang memiliki kandungan timbal ditunjukkan pada gambar 2.6.

Composition of a 12V-44Ah-210 A-starter battery in a hard rubber casing	
lead containing components	58,8%
hard rubber	17,7%
sulphuric acid	26,2%
separators (PVC)	2,3%

	100,0%
total weight	approximately 15 kg
Composition of a modern 12V-44Ah-210 A-starter battery in PP-casing	
lead containing components	63,9%
PP-components	5,0%
sulphuric acid	28,6%
separators (PP, PVC, cellulose)	2,5%

	100,0%
total weight	approximately 13-14 kg

Gambar 2.5 Komposisi Aki

Grid metal, poles, bridges		44%
Pb	96-98%	
Sb	2-4%	
(Ca)	<0,5%	
Paste		56%
PbSO ₄	60%	
PbO (PbO ₂)	19%	
PB	21%	
		100%

Gambar 2.6 Perkiraan Komposisi dari Komponen Aki yang Mengandung Timbal

Grid untuk aki tipe lama memiliki kandungan Antimon (Sb) yang lebih tinggi (~ 4 %) daripada aki modern (~ 2 %), dimana selain itu masih ditambahkan Kalsium (Ca) pada paduan *grid* sebesar < 0,5 %. [Ref. 20]

2.2 Timbal (Pb)

2.2.1. Sejarah Perkembangan Timbal

Timbal (Pb) adalah satu dari tujuh logam pada jaman kuno, merupakan rekor penemuan yang paling tua. Pada saat dahulu, inti Pb telah dinilai sebagai sebuah mata cat dan material ornamental, dan lebih dekat diketahui artifak Pb, ditemukan di Turki pada tahun 6500 SM. Simbol kimia untuk timbal, Pb, berasal dari bahasa latin, *Plumbum*. Timbal sangat lembut, termasuk logam dengan titik leleh rendah, padat pada temperatur ruang/kamar dan dikenal dengan warna perak abu-abu, memiliki sifat dapat ditempa dan wajar mempunyai kepadatan tinggi. Timbal meleleh pada suhu 327°C dan mendidih pada 1751 °C. Timbal merupakan salah satu jejak elemen di kulit bumi yang keras, dalam arti melimpah hingga ~13 ppm, tetapi timbal dapat dihadirkan dalam jumlah yang besar sebagai galena (PbS) ada co-mineral dengan tembaga, perak, emas, seng, timah, arsenic dan antimonium. Inti-inti timbal secara luas didistribusikan dan diproduksi secara komersial di lebih 50 negara, produksi terbesar dilakukan oleh USA, dahulu USSR, Australia, Peru, China dan Kanada. Kira-kira 5 juta ton Pb diproduksi setiap tahun, bagaimanapun sumber produksi kedua dari Pb menjadi produksi primer yang lebih dominan. Penggunaan utama dari Pb yaitu pada baterai, pigmen dan kimia, bensin antiknock aditif, pembungkus kabel, solder dan aplikasi lainnya. Timbal merupakan logam beracun dan tingkatan tinggi dari emisi dalam lingkungan kota yang merupakan sebuah masalah kesehatan masyarakat, pada umumnya terjadi pada negara berkembang Pada tingkatan tinggi dari ekspose manusia untuk Pb, menghasilkan kerusakan pada hampir semua organ dan sistem organ, yang lebih penting pusat sistem gelisah, ginjal dan darah, sedang pada tingkatan rendah, berpengaruh pada darah sintesis dan proses-proses biokimia lainnya dan *biological* serta lemahnya fungsi neologikal bersama efek lainnya. [Ref. 10]

2.2.2. Sifat Fisis Timbal (Pb)

Merupakan logam perak abu-abu yang mengkilap, mempunyai struktur kristal FCC (*Face Centered Cubic*), mudah dicor, dirol dan diekstrud, kekentalan (*density*) 11.3 kg/cm³, angka kekerasan moh's sama dengan 1, angka kekerasan Brinell sama dengan

4.0 (logam dengan kemurnian tinggi), mudah dilelehkan, meleleh pada temperatur 327.46 °C, menguap pada suhu 1749 °C, tekanan uap 1 torr pada suhu 970 °C dan 10 torr pada suhu 1160 °C, penghantar listrik yang jelek, hambatan jenis (ρ) 20.65 microhm-cm pada suhu 20 °C dan dari cairan meleleh 94.6 microhm-cm pada titik leleh; viskositas dari logam yang dicairkan 3.2 centipoise pada titik leleh dan 2.32 centipoise pada 400 °C; regangan permukaan 442 dyne/cm pada 350 °C; kekuatan tarik 2000 psi; penampang serap thermal neutron 0.17 barn; standar elektroda potensial, $\text{Pb}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Pb} \rightleftharpoons -0.13 \text{ V}$; bersifat tahan terhadap korosi. [Ref. 5 hal. 453-454]

2.2.3. Jenis – jenis Timbal Komersial

a. Galena (PbS) – 86,6% Pb

Galena merupakan bentuk mineral alami dari timbal sulfida dan inti timbal yang sangat penting. Galena menyimpan sejumlah perak penting seperti dimasukkan tahap mineral sulfida perak atau sebagai larutan padat terbatas di dalam struktur galena. Galena yang mengandung perak ini menjadi bijih perak paling utama di dalam menambang, sebagai tambahan seng, cadmium, antimonium, bismut dan arsenik juga terjadi di sejumlah variabel di dalam bijih timbal (gambar 2.7).



(a)



(b)

Gambar 2.7 (a) Gambar unit sel dari galena, (b) Kristal galena dari Kansas.

Ciri-ciri galena dapat dilihat dalam tabel 2.1 berikut :

Tabel 2.1 Ciri-ciri galena [Ref . 13]

Uraian	Keterangan
Formula kimia	PbS
Warna	Timbal abu-abu, perak kubus dan oktahedra
Bentuk kristal	Isometrik hexoctrahedral
Perpecahan	Kubus
Skala kekerasan Mohs	2,5 – 2,75
Warna kilauan	<i>Metallic</i>
Indeks bias	Buram (<i>opaque</i>)
Spesifik gravitasi	7,4 – 7,6
Sifat lumer (<i>fusibility</i>)	2

b. Kerisit (PbCO_3)

Kerisit berasal dari bahasa latin *cerussa* yang artinya timbal putih adalah mineral yang terdiri dari timbal karbonat (PbCO_3) dan merupakan bijih timbal yang penting. Pada tahun 1565 senyawa ini disebut *cerussa nativa* (oleh K. Gesner), pada tahun 1832 FS. Beudant manamainya *cruse*, sedang nama kerisit (*cerrusite*) dimulai oleh W. Haidinger.

Kerisit umum terdapat dalam bentuk kristal. Kerisit mengkristal dalam sistem ortorhombik dan berisomorf dengan aragonit. Mirip seperti aragonit, kerisit juga sering mengalami perubahan, dan berbentuk pseudo-heksagonal. Tiga kristal biasanya berada pada dua muka prisma, menghasilkan kelompok stelat bergaris enam dengan masing-masing kristal saling bersilangan dengan sudut sekitar 60° . Kristal kerisit biasanya memiliki penampilan yang terang dan halus. Kerisit juga terdapat dalam bentuk kelompok butiran yang kompak, atau kadang-kadang dalam bentuk serat. Biasanya kerisit berwarna putih atau tidak berwarna, kadang-kadang juga abu-abu atau kehijauan yang diperlihatkan pada gambar 2.8. Mineral ini sangat rapuh, dan memiliki retakan konkoid. Mineral ini memiliki tingkat kekerasan 3 hingga 3,75 dalam skala Mohs, dan massa jenis $6,5 \text{ g/cm}^3$. Iglesiasit adalah kerisit yang memiliki kandungan 7 % seng karbonat, dinamai menurut tempatnya ditemukan, yaitu Iglesias di Sardinia.



Gambar 2.8 Kerusit dalam bentuk bijih kristalin.

Senyawa ini dikenali melalui pengembaraannya yang khas, serta sifat pemantulan cahayanya yang disebut *adamantine lustre*, serta massa jenisnya yang tinggi. Mineral ini tidak larut dalam air, namun larut dalam asam nitrat encer berbuih. Dalam tes *blowpipe*, mineral ini melebur dengan cepat, yang mengindikasikan kandungan timbal.

Ciri-ciri Kerusit dapat dilihat dalam tabel 2.2 berikut :

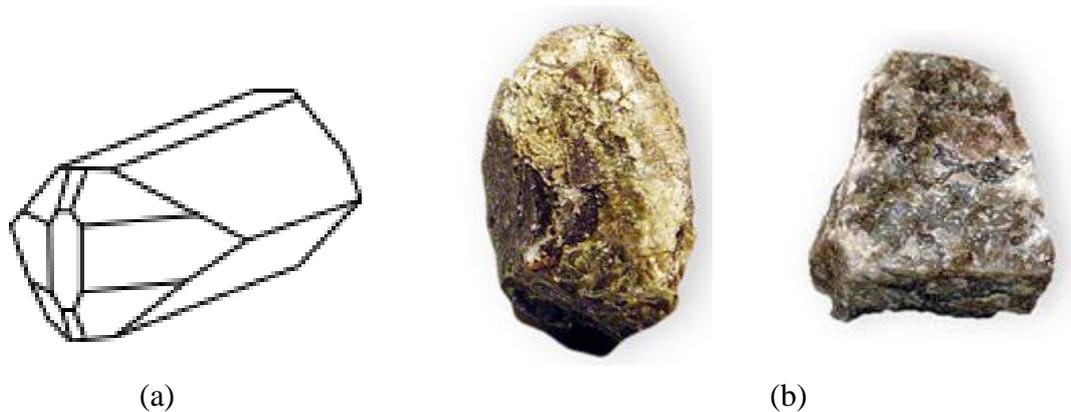
Tabel 2.2 Ciri-ciri Kerusit [Ref . 12]

Uraian	Keterangan
Formula kimia	PbCO_3
Warna	Putih, abu-abu, biru, hijau
Bentuk kristal	Dypiramidal (2/m 2/m 2/m)
Bentuk pecahan	Baik (110) dan (021)
Skala kekerasan Mohs	3 – 3,5
Warna kilauan	Tidak fleksible, seperti kaca
Indeks bias	$n\alpha = 1,803$; $n\beta = 2,074$; $n\gamma = 2,076$
Sifat optik	Biaksial (-)
Spesifik gravity	6,53 – 6,57

c. Anglesit (PbSO_4)

Anglesit merupakan sebuah mineral timbal sulfat (PbSO_4). Terbentuk dari sebuah produk oksidasi dari inti timbal sulfida primer, yaitu *galena*. Anglesit terbentuk sebagai kristal primatik orthorhombik dan massa seperti tanah, dan isomorfous dengan *barite* dan *celestine* (gambar 2.9).

Anglesit memiliki berat gravitasi spesifik dari 6,3 pada saat timbal berisi 74% berat, dengan nilai kekerasan 2,5 – 3. Berwarna putih, abu-abu dengan lapisan kuning pucat. Dan mungkin berubah gelap jika tidak murni.



Gambar 2.9 (a) Bentuk kristal anglesit, orthorhombik; (b) Anglesit.

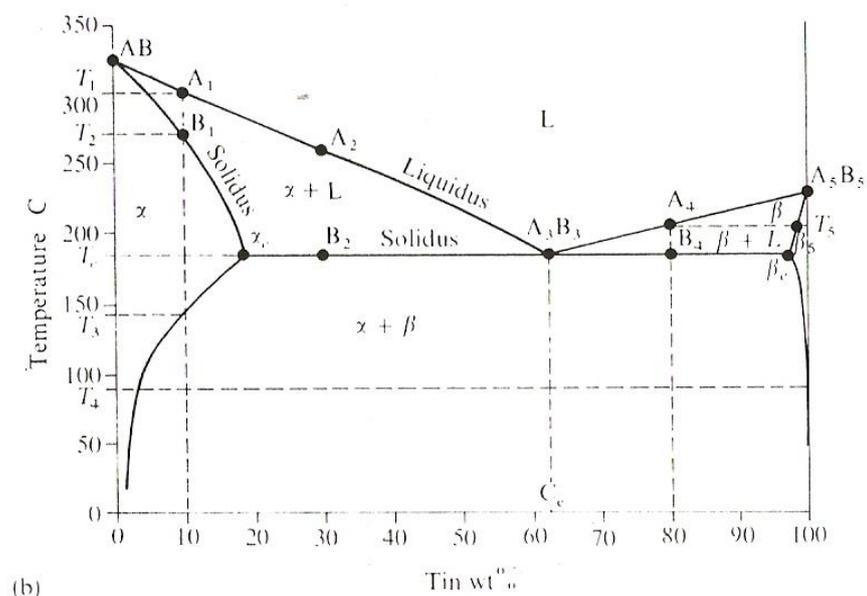
Anglesit pertama dikenali sebagai jenis mineral oleh William Yang ditemukan pada tahun 1783, di pertambangan tembaga Parys di Anglesey. Nama anglesit tersebut, dari tempat ini, dinamai oleh F. S. Beudant pada tahun 1832. Kristal dari Anglesey, yang mana dahulu ditemukan dengan berlimpah-limpah pada suatu acuan batu besi coklat yang tumpul, dalam ukuran kecil dan sederhana dalam bentuknya, yang pada umumnya dibatasi oleh empat muka dari suatu prisma dan empat muka dari suatu kubah; yaitu brownish-yellow di dalam warna yang berhubungan dengan suatu noda batu besi coklat, seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.9. Kristal dari beberapa tempat lain, khususnya dari Monteponi di Sardinia, tidak berwarna pucat, yang memiliki warna mengkilap yang tidak fleksible, dan pada umumnya dimodifikasi oleh banyak permukaan yang terang. Ciri-ciri anglesit dapat dilihat dalam tabel 2.3 berikut :

Tabel 2.3 Ciri-ciri Anglesit [Ref. 11]

Uraian	Keterangan
Formula kimia	PbSO ₄
Warna	Putih, abu-abu, orange, kuning, hijau, biru, sedikit ungu
Bentuk kristal	<i>Orthtorhombic-Dypiramidal</i> (2/m 2/m 2/m)
Bentuk pecahan	Baik (001) dan distinct (021)
Skala kekerasan Mohs	2,5 - 3
Warna kilauan	Tidak fleksible, gelap ketika bercampur tanah
Indeks bias	$n\alpha = 1,878$; $n\beta = 1,883$; $n\gamma = 1,895$
Sifat optik	Biaksial (+)
Spesifik gravitasi	6,3
Sifat lumer (<i>fusibility</i>)	1,5

2.2.4. Diagram Fasa Timbal-Timah

Fasa merupakan bagian sistem yang homogen, yang mempunyai karakteristik fisik dan kimia yang seragam. Material yang 100 % murni dapat dikatakan berada dalam kondisi satu fasa. Demikian halnya dengan larutan padat, cair ataupun gas. Jika dalam suatu sistem terdapat lebih dari satu fasa, maka tiap-tiap fasa tersebut akan memiliki sifat-sifat khusus tersendiri (gambar 2.10).



Gambar 2.10 Diagram fasa Timbal (Pb) – Timah (Sn)

Diagram fasa memiliki arti penting dalam sistem paduan, karena terdapatnya hubungan antara struktur mikro dengan sifat-sifat mekanis suatu material, dimana perubahan struktur mikro suatu paduan berhubungan dengan karakteristik diagram fasanya. Selain itu diagram fasa juga memberikan informasi tentang melting point, pengintian, rekristalisasi dan fenomena-fenomena lainnya.

Pada diagram fasa di bawah ini, α dan β merupakan larutan padat dari timah dalam timbal dan timbal dalam timah. Hal itu dapat dilihat pada komposisi yang dapat dipertimbangkan pada garis horizontal, berdasarkan pada titik pertemuan $180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Temperatur pada garis horizontal solidus disebut temperatur eutektik dan komposisi dimana liquidus bertemu dengan garis horizontal solidus disebut komposisi eutektik, C_e . C_e ini penting sebagai catatan bahwa komposisi eutektik sangat tidak mungkin untuk menjadi komposisi equiatomik (50 % - 50 %), tetapi variasi dari sistem ke sistem, dalam hal ini terjadi sekitar 62 wt% Sn (~73 at % Sn).

Solidifikasi dari beberapa paduan dalam Pb-Sn dapat kita ambil sebagai contoh yaitu pada Pb-10wt% Sn, yang mana merupakan ciri khas dari sebagian kecil paduan yang berisi lebih sedikit timah dari pada komposisi yang ditunjukkan sebagai α_e pada gambar 2-4. Dibawah kondisi keseimbangan (*equilibrium*) paduan ini akan memadat untuk sifat keseimbangan padatan yang dapat dicampur, yaitu: pemadatan akan dimulai pada temperatur T_1 dan berakhir pada T_2 , menghasilkan butiran yang homogen dari larutan padat α . Hal yang menarik pada sekitar titik paduan ini yaitu sebagai pendingin pada padatan, batas kepadatan dari timah dalam timbal dicapai pada temperatur T_3 . Pada temperatur di bawah T_3 , fase β mulai mempercepat di luar larutan padat. Pada temperatur T_4 , komposisi pada fase α dan β akan berada dalam keseimbangan keduanya pada batasan wilayah fase α dan fase β , dinamakan Pb-4 wt% Sn dan hampir 100 % Sn.
[Ref.1 hal. 231]

2.3. Daur Ulang Timbal

Daur ulang aki ditujukan untuk mengambil logam timbal (Pb) atau disebut juga ingot dan plastik box, untuk dimanfaatkan kembali. Teknologi yang digunakan juga bermacam-macam dari yang sangat sederhana hingga teknologi tinggi, tetapi pada

dasarnya logam timah diambil dengan cara reduksi-oksidasi unsur timbal yang ada di dalam.

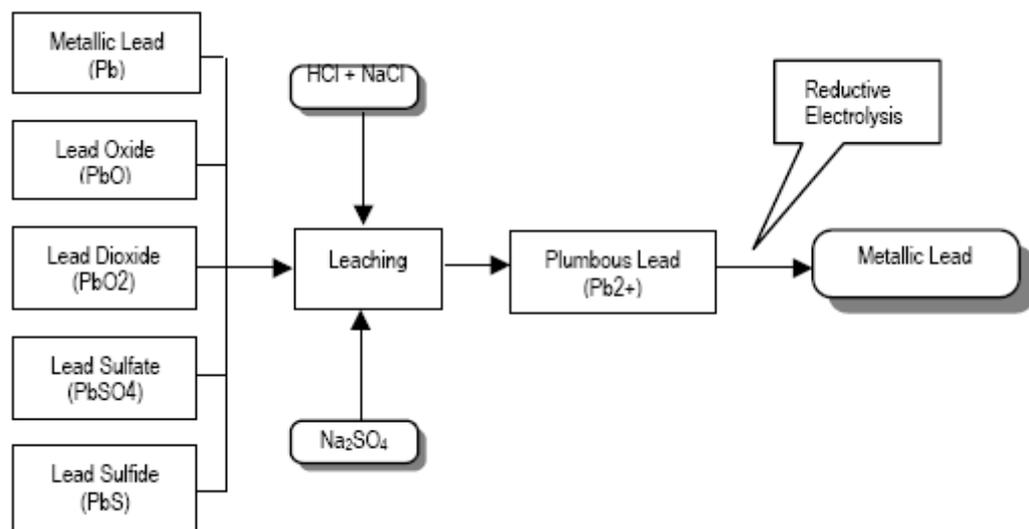
Timbal merupakan tingkatan paling tinggi daur ulangnya dari semua logam. Karena timbal berlawanan dengan korosi, timbal sisa dapat digunakan untuk daur ulang selama dekade bahkan berabad-abad setelah diproduksi.

Didalam melakukan daur ulang timah dikenal beberapa alternatif teknologi. Pemilihan teknologi ini akan menentukan desain peralatan yang akan dipergunakan. Namun secara umum dalam usaha daur ulang timah dikenal teknologi sebagai berikut:

a. Elektrokimia

Yang dimaksud proses elektrokimia yaitu melakukan leaching segala metal maupun ion Pb menjadi Pb^{2+} selanjutnya dengan proses elektrolisis Pb^{2+} diubah menjadi Pb metal. Proses ini jarang dilakukan oleh industri kecil menengah maupun rumah tangga di Indonesia hal ini dikarenakan biaya investasi serta operasional yang mahal (gambar 2.11).

Diagram proses elektrokimia adalah sebagai berikut :



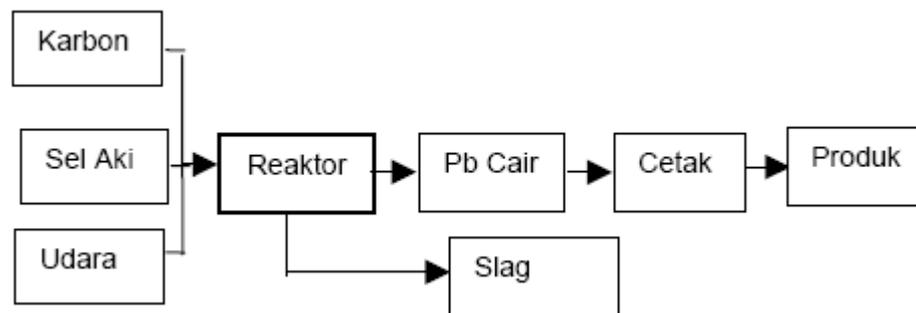
Gambar 2.11 Skema proses elektrokimia

b. Metode Redoks

Proses ini menggunakan karbon/arang serta udara sebagai reduktor dan oksidator untuk melelehkan sel aki menjadi timah cair. Suhu diperlukan untuk melelehkan

timah sehingga akan terpisah anatar timah dan pengotor diantaranya sulfur. Suhu operasi terjadi lebih dari 500°C . Proses ini banyak dilakukan di Indonesia, baik dengan teknologi yang sangat sederhana maupun yang sudah maju (gambar 2.12).

Skema proses redoks adalah sebagai berikut :



Gambar 2.12 Skema Metode Redoks [Ref. 16 hal. 171-172]

2.3.1. Proses Peleburan

Seperti yang telah diuraikan di atas bahwa banyak teknologi yang digunakan untuk mendaur ulang timbal aki bekas, namun dalam penelitian kali ini kami menggunakan proses *redoks* (reduksi-oksidasi). Proses ini menggunakan gas LPG dan oksigen sebagai reduktor dan oksidator untuk melelehkan sel aki menjadi timah cair. Suhu diperlukan untuk melelehkan timah sehingga akan terpisah antara timah dan pengotor di antaranya sulfur.

Tahap persiapan

Mula-mula aki bekas yang tidak terpakai lagi dipisahkan antara plastik (kotak pembungkus) dan sel aki yang ada di dalam aki. Sel aki yang di dalam inilah yang nantinya akan dilebur yang mengandung banyak timbal. Tahap ini juga meliputi peralatan yang digunakan dalam proses peleburan seperti tungku, cetakan, bahan bakar dan lain-lain.

Tahap peleburan

Sel aki yang sudah siap selanjutnya dimasukkan dalam ladai yang sudah siap untuk melebur komponen tersebut. Selanjutnya ladai yang sudah berisi sel aki tersebut dibakar sampai mencair dalam tiga variasi suhu yaitu 450°C , 500°C dan 550°C . Karena sel aki

yang dilebur masih mengandung beberapa unsur selain timbal maka perlu dilakukan pemisahan unsur-unsur tersebut untuk mendapatkan timbal yang murni.

Tahap pengecoran

Setelah timbal cair yang sudah dibersihkan dari unsur-unsur selain timbal, selanjutnya dituang ke dalam cetakan yang telah disiapkan sebelumnya. Dalam penelitian ini cetakan yang digunakan berbentuk tirus yang terpotong, dan karena sedikitnya material yang dilebur maka volume yang dituang sedikit dan cukup untuk dianalisa.

Tahap pendinginan

Proses pendinginan yang dilakukan yaitu dengan cara mendinginkan pada udara terbuka dan dibiarkan begitu saja sampai timbal tersebut dingin dan memadat.

2.3.2 Spesifikasi Daur Ulang Timbal

Di keseluruhan dunia, dua spesifikasi timbal berlaku, yang pertama dengan minimum 99.99% Pb dan kedua minimum 99.97% Pb. Ketidakbersihan dalam timbal antara lain antimonium, arsenic, bismuth, tembaga, nikel, perak, timah dan seng. Baru-baru ini, selenium dan tellurium telah ditambah sebagai tambahan penting. Perusahaan timbal besar umumnya memproduksi timbal dengan kandungan 99.99% Pb, sedangkan untuk produksi daur ulang sebesar 99.97% Pb. Perbedaan terbesar dalam tingkatan timbal yaitu daur ulang umum tidak menghilangkan bismuth dan perak dalam proses penyulingan. Daur ulang timbal pada umumnya berisi cukup bismuth untuk mencapai kemurnian 99.99%. [Ref .2]

2.3.3 Kegunaan Timbal Hasil Daur Ulang

Daur ulang aki ditujukan untuk mengambil logam timbal (Pb) atau disebut juga ingot dan plastik box, untuk dimanfaatkan kembali. Teknologi yang digunakan juga bermacam-macam dari yang sangat sederhana hingga teknologi tinggi, tetapi pada dasarnya logam timah diambil dengan cara reduksi-oksidasi (redoks) unsur timbal yang ada di dalam.

Dari proses daur ulang tersebut dihasilkan 2 jenis material yaitu :

1. Logam/Ingot timbal dimanfaatkan oleh :
 - Pabrik aki sebagai sel aki baru

- Pabrik cat
- Pabrik tabung TV
- Keramik dan isolasi radio aktif
- Pabrik kabel (sebagai pelindung kawat) dan pipa plastik
- Penangkal radiasi
- Kawat solder

2. Plastik box dimanfaatkan oleh:

- Pabrik aki
- Pabrik plastik

[Ref. 16 hal. 171]

2.4. Pemeriksaan dan Pengujian Spesimen

Pemeriksaan dan pengujian dilakukan sesuai dengan tujuan penelitian ini yaitu untuk mengetahui komposisi timbal dan angka kekerasan dari timbal hasil daur ulang dengan metode redoks.

2.4.1. Pengujian Komposisi Timbal

Pengujian komposisi timbal dengan menggunakan pengujian *X-Ray Fluoration* (XRF). Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Kimia Analitik Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan - BATAN Yogyakarta. Alat analisis *X-Ray Fluorescence* (XRF) dapat digunakan untuk mengidentifikasi kandungan logam berat baik secara kualitatif ataupun secara kuantitatif dalam sampel lingkungan atau sampel-sampel lainnya yang mempunyai matriks yang sama. Metode ini mempunyai kelebihan dibandingkan lainnya, yaitu dapat digunakan untuk analisis sampel dalam bentuk padatan dan cairan tanpa merusak komposisi sampel (non destructive method).

Dasar analisis alat X-Ray Fluorescent ini adalah pencacahan sinar x yang dipancarkan oleh suatu unsur akibat pengisian kembali kekosongan elektron pada orbital yang lebih dekat dengan inti (karena terjadinya eksitasi elektron) oleh elektron yang terletak pada orbital yang lebih luar. Pengisian elektron pada orbital K akan menghasilkan spektrum sinar x deret K I pengisian elektron pada orbital berikutnya menghasilkan spektrum sinar X deret L, deret M, deret N dan seterusnya.

Setiap unsur akan memancarkan sinar-X dengan energi karakteristik. Sifat karakteristik tersebut digunakan untuk analisis kualitatif. Energi sinar-X yang dipancarkan dideteksi dengan detektor penangkap sinar-X kemudian diubah menjadi pulsa-pulsa listrik lalu diperkuat oleh penguat awal dan penguat akhir, sehingga terbentuk sebuah spektrum. Analisis kuantitatif dilakukan dengan cara menginterpolasi intensitas sinar-X suatu unsur pada kurva kalibrasi standar. Zat standar yang digunakan diusahakan mempunyai sifat fisik dan kimia yang mirip dengan sampel.

[Ref. 18]

2.4.2. Pengujian Kekerasan

Kekerasan merupakan ketahanan suatu material terhadap penetrasi material lain. Kekerasan suatu bahan mempunyai berbagai macam pengertian tergantung pada pengalaman pihak-pihak yang terlibat. Pada umumnya kekerasan menyatakan ketahanan terhadap deformasi, dan untuk logam dengan sifat tersebut ketahanannya terhadap deformasi plastik atau deformasi permanen.

Untuk orang-orang yang berkecimpung dalam mekanika pengujian bahan banyak yang mengartikan kekerasan sebagai ukuran ketahanan terhadap lekukan. Untuk para insinyur perancang, kekerasan sering diartikan sebagai kemudahan dan kuantitas khusus yang menunjukkan sesuatu mengenai kekuatan dan perlakuan panas dari suatu logam.

Terdapat tiga jenis umum mengenai ukuran kekerasan yang tergantung cara melakukan pengujian yaitu:

a. Kekerasan goresan (*scratch hardness*)

Kekerasan goresan diukur sesuai dengan skala Mohs. Skala ini terdiri atas 10 standar mineral disusun berdasarkan kemampuannya untuk digores. Mineral yang paling lunak pada skala ini adalah talk (kekerasan gores 1), sedangkan intan mempunyai kekerasan 10. Kuku jari mempunyai kekerasan sekitar 2, tembaga yang dilunakkan kekerasannya 3, dan martensit 7.

Skala Mohs tidak cocok untuk logam, karena interval skala pada nilai kekerasan tinggi tidak benar. Logam yang paling keras mempunyai harga kekerasan pada skala Mohs, antara 4 sampai 8. Suatu jenis lain pengukuran kekerasan goresannya adalah

mengukur kedalaman atau lebar goresan pada permukaan benda uji yang dibuat oleh jarum penggores yang terbuat dari intan dan diberi beban yang terbatas.

b. Kekerasan pantulan (*rebound/dynamics hardness*)

Pada pengukuran kekerasan dinamik, biasanya penumbuk dijatuhkan ke permukaan logam dan kekerasan dinyatakan energi tumbuknya. Skleroskop Shore (*shore scleroscope*), yang merupakan contoh paling umum dari suatu alat penguji kekerasan dinamik mengukur kekerasan yang dinyatakan dengan tinggi lekukan atau tinggi pantulan.

Hampir semua pengujian kekerasan dinamik sebenarnya pengujian indentasi, tanpa memperhatikan beban yang dipakai. Peralatan pengujian kekerasan dinamis modern yang banyak dipakai adalah pengukuran kekerasan oleh instrumen ini berdasarkan kekerasan pantulan (*rebound hardness*).

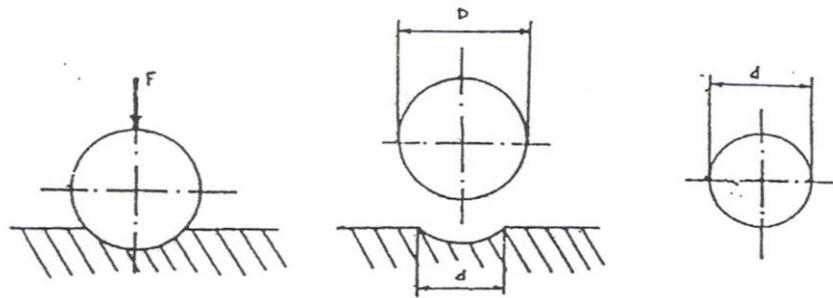
Scleroscope hardness ditunjukkan oleh angka yang diberikan oleh tingginya pantulan oleh ujung palu kecil setelah dijatuhkan dalam tabung gelas dari ketinggian 10 inchi (254 cm) terhadap permukaan spesimen. Standar palu (*hammer*) kira-kira berdiameter 6 mm, berat 2,36 gram dengan ujungnya dilapisi intan dengan jari-jari 0,25 mm (ASTME 448). Keuntungan dari metode ini yaitu dapat digunakan untuk mengukur kekerasan suatu material yang sangat tipis dan keras, sedangkan kelemahannya yaitu tidak mengetahui beban yang dipakai.

c. Kekerasan lekukan (*indentation hardness*)

Dari ketiga cara pengujian tersebut, indentasion hardness adalah banyak yang digunakan. Tidak adanya skala kekerasan yang mutlak, maka hanya dengan cara pengetesan ini dapat distandarisasi. Pengetesan ini dapat dilakukan terhadap logam hasil perlakuan panas (*heat treatment*). Indentasion hardness terdiri dari:

1. Metode Brinell

Uji kekerasan lekukan ini pertama kali dilakukan oleh Brinell pada tahun 1900. Penetrator yang digunakan berupa bola baja yang dikeraskan dengan diameter 0,625 s/d 10 mm dan standar beban 0,97 s/d 3000 kgf. Lama penekanan 20 s/d 30 detik. Kekerasan yang diberikan merupakan hasil bagi beban penekan dengan kekerasan permukaan lekukan bekas penekanan dari bola baja (gambar 2.13).



Gambar 2.13 Metode Brinell.

$$HB = \frac{P}{\frac{\pi}{2} D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Dimana : HB = Nilai kekerasan Brinell

P = Beban yang diterapkan, kg

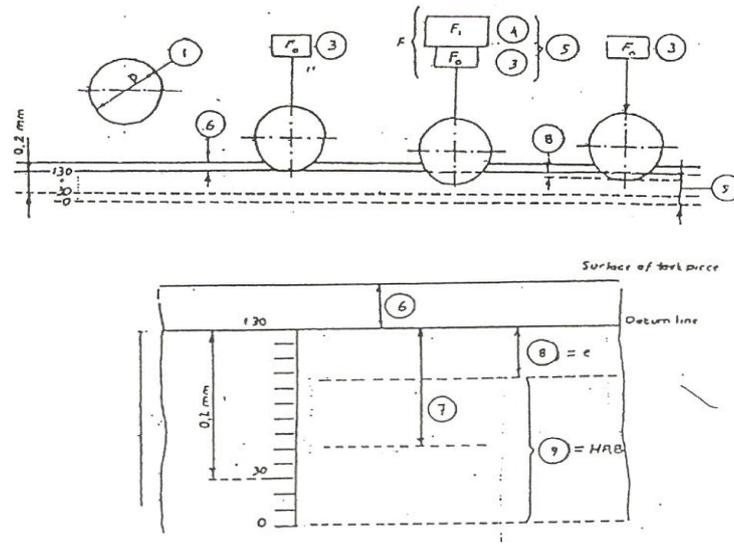
D = Diameter bola

d = Length lekukan

Diameter lekukan diukur pada kaca pembesar dengan menggunakan mistar yang sesuai dengan pembesarannya. HB dilihat langsung dalam tabel yang tertera pada body preparat. Bola baja hanya digunakan untuk mengetes baja yang dikeraskan, besi tuang kelabu dan non logam. Metode Brinell kurang sensitif pada permukaan yang tidak teratur karena besarnya pembebanan.

2. Metode Rockwell

Dalam metode ini penetrator ditekan dalam benda uji. Harga kekerasan didapat dari perbedaan kedalaman yang didapat dari beban mayor dan minor. Beban minor adalah beban awal yang diberikan untuk pengujian kekerasan Rockwell yang sudah ditetapkan. Sedangkan beban mayor adalah beban minor ditambah dengan tambahan yang diberikan dalam pengujian kekerasan Rockwell yang telah ditetapkan. Metode ini sangat cepat dan cocok untuk pengetesan massal (gambar 2.14).

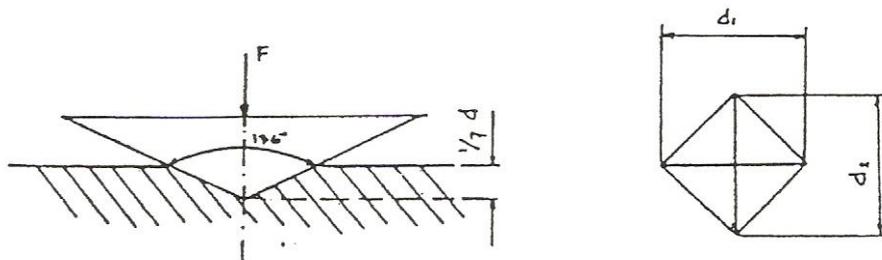


Gambar 2.14 Pengujian Kekerasan Rockwell.

Uji kekerasan Rockwell sangat berguna dan mempunyai kemampuan ulang (*reproducible*) asalkan sejumlah kondisi sederhana yang diperlukan dapat dipenuhi.

3. Metode Vickers

Metode ini mirip dengan metode Brinell tetapi penetrator yang dipakai berupa intan berbentuk piramida dengan dasar bujur sangkar dan sudut puncak 136°. Beban yang digunakan biasanya 1 s/d 120 kg (gambar 2.15).



Gambar 2.15 Pengujian Kekerasan Vickers.

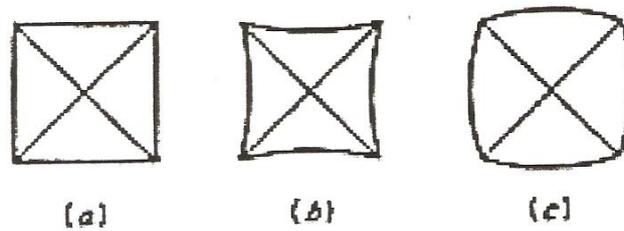
Persamaan yang digunakan dalam pengujian kekerasan Vickers adalah sebagai berikut :

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$HV = 1,854 \frac{F}{D^2}$$

Dimana : F = Beban yang ditetapkan

L = Panjang diagonal rata-rata

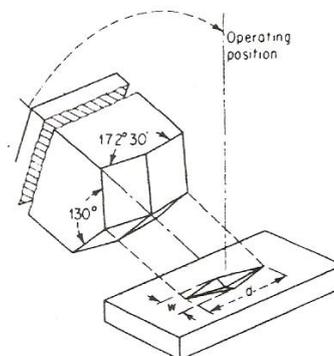


Gambar 2.16 Lekukan oleh piramida intan.

Lekukan yang benar yang dibuat oleh penumbuk piramida intan harus berbentuk bujur sangkar (gambar 2.16.a). Akan tetapi penyimpangan pada uji Vickers sering juga ditemukan lekukan bantal jarum pada (gambar 2.16.b) adalah akibat pengukuran terjadinya penurunan logam di sekitar permukaan piramida yang datar. Keadaan demikian terdapat pada logam-logam yang dilunakkan dan mengakibatkan pengukuran panjang diagonal yang berlebih. Lekukan berbentuk tong pada (gambar 2.16.c) terdapat pada logam-logam yang mengalami proses pengerjaan dingin. Bentuk demikian diakibatkan oleh penimbunan ke atas logam-logam di sekitar permukaan penumbuk.

4. Uji Kekerasan Mikro (*Microhardness Tester*)

Banyak persoalan metalurgi memerlukan data-data mengenai kekerasan pada daerah yang sangat kecil. Pengukuran gradien kekerasan pada permukaan yang dikarburasi, pengukuran kekerasan kandungan tunggal pada struktur mikro, atau penentuan kekerasan roda gigi arloji, merupakan tipe persoalan dari jenis pengujian kekerasan mikro. Pengembangan penumbukan Knoop oleh Biro Standar Nasional dan pengenalan uji Tukon untuk mengontrol pemakaian beban di bawah 25 g, menyebabkan pengujian kekerasan mikro merupakan kegiatan laboratorium yang rutin (gambar 2.17).



Gambar 2.17 Penumbuk Knoop.

Penumbuk Knoop adalah intan kasar yang dibentuk menjadi piramida sedemikian hingga dihasilkan lekukan bentuk intan dengan perbandingan diagonal panjang dan pendek adalah 7 : 1. Angka kekerasan Knoop (KHN) adalah beban dibagi luas proyeksi lekukan yang tidak akan kembali ke bentuk semula.

$$KHN = \frac{P}{A_p} = \frac{P}{L^2 C}$$

Dimana : P = Beban yang diterapkan, kg

A_p = Luas proyeksi lekukan yang tidak pulih ke bentuk semula

L = Panjang diagonal yang lebih panjang

C = Konstanta untuk setiap penumbukan

Bentuk penumbuk Knoop yang khusus, memberikan kemungkinan membuat lekukan yang lebih rapat dibandingkan lekukan Vickers, sebagai contoh : untuk mengukur gradien kekerasan yang curam. Keuntungan lain adalah bahwa untuk diagonal yang panjang, luas dan kedalaman kekuatan Knoop kira-kira hanya 15% dari luas lekukan Vickers untuk panjang diagonal yang sama. Hal ini sangat berguna khususnya apabila mengukur kekerasan lapisan tipis (misal lapisan hasil elektroplating) atau apabila mengukur kekerasan bahan getas, di mana kecenderungan terjadinya patah sebanding dengan volume bahan-bahan yang ditegangkan.

Bahan kecil yang digunakan pada uji mikro memerlukan penanganan yang sangat hati-hati pada setiap tahap pengujian. Permukaan benda uji harus dipersiapkan secara hati-hati. Biasanya dibutuhkan proses poles metalografi. Pengerasan kerja pada permukaan selama proses poles dapat mempengaruhi hasil pengujian.

Diagonal panjang jejak Knoop pada dasarnya tidak dipengaruhi oleh pengembalian bentuk elastik untuk beban-beban di atas 300 g. Akan tetapi, untuk beban yang lebih ringan maka suatu pengembalian secara elastis yang kecil menjadi lebih besar. Kedua faktor di atas mempunyai pengaruh untuk pembacaan kekerasan yang tinggi, sehingga biasanya angka kekerasan Knoop yang teramati membesar sejalan dengan penurunan beban, untuk beban di bawah 300 g. Tarasov dan Thibault telah mengemukakan bahwa jika dibuat koreksi untuk pengembalian bentuk elastis dan ketajaman pengamatan, maka angka kekerasan Knoop konstan untuk beban di bawah 100 gram.

5. Metode Rockwell Superficial

Perbedaan dengan Rockwell biasa adalah dalam beban minor dan beban mayor. Pada Rockwell Superficial beban minor adalah 3 kg, sedangkan beban mayor adalah 15 kg, 30 kg dan 45 kg. Pemberian skala yang teridentifikasi ditulis dengan simbol HR, sebagai contoh 60 HR30W berartikan angka kekerasan yang dimiliki adalah 60 dengan pembebanan mayor 30. Keuntungan dari metode ini adalah lekukan yang dihasilkan kecil sehingga cocok untuk pengujian material yang dikenai *surface hardening*, sedangkan kekurangannya adalah mahal.

6. Metode Meyer

Meyer hampir sama dengan Brinell, yang membedakan adalah pada Meyer yang diperhatikan adalah *projected area* pada bebas indentasi sedangkan pada Brinell adalah pada luas area permukaan indenter dan indentasinya sama dengan beban dibagi *projected area* dari bekas indentasi.

$$P = \frac{P}{\pi \cdot r^2}$$

Cara menghitung kekerasan dengan metode Meyer atau MHN :

$$MHN = \frac{4P}{\pi \cdot d^2}$$

Seperti uji kekerasan Brinell, uji kekerasan Meyer memiliki satuan kg/mm^2 . Uji Meyer kurang sensitif dibandingkan dengan uji kekerasan Brinell. Untuk pengerjaan pendinginan pengujian kekerasan Meyer lebih konstan dan valid dibandingkan dengan uji kekerasan Brinell yang hasilnya berfluktuasi. Uji kekerasan Meyer lebih fundamental dalam perhitungan kekerasan indentasi namun secara prakteknya jarang digunakan untuk pengujian kekerasan.

7. Metode Property and Durometer Hardness

Durometer hardness test sangat akurat karena semua pengukuran menggunakan komputer. Mengurangi atau menghilangkan faktor *human error* dalam hasil test. Terdapat dalam beberapa model pilihan. Indenter berbentuk baja bola sehingga mengurangi kemungkinan keretakan dalam spesimen uji dan mengurangi ketidakonsistenan hasil. Kekurangan alat ini adalah sangat mahal. [Ref. 4]

Tabel 2.4 memuat kesimpulan beberapa metode pengujian kekerasan.

Tabel 2.4 Perbandingan Berbagai Kekerasan

Metode	Kelebihan	Kekurangan
Metode Brinell	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Permukaan Spesimen tidak kritis/tidak licin ▪ Cocok untuk material hasil <i>forging, casting, heat treatment, gear</i> dan <i>cast iron</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Jejak yang diberikan indenter besar ▪ Metode pengujian terlalu rumit ▪ Material harus cukup tebal agar tidak terjadi efek anvil
Metode Rockwell	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sederhana dan tidak memerlukan keahlian khusus ▪ Cepat dan cocok untuk pengujian massal ▪ Dengan indenter dan gaya yang sama dapat digunakan 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ketelitian kurang ▪ Kurang cocok untuk spesimen keras/ulet ▪ Permukaan spesimen harus halus dan bersih ▪ Material harus tebal terhindar efek anvil
Metode Vickers	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tidak merusak spesimen ▪ Lebih presisi (skala mikro) ▪ Cocok untuk spesimen uji kecil ▪ Sebelum melakukan penelitian bisa terlihat dulu struktur mikro 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Waktu pengujian lebih lama ▪ Permukaan spesimen harus licin ▪ Peralatan mahal