II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Zeolit

Zeolit ditemukan pertama kali oleh Cronstedt pada tahun 1756 di Swedia. Zeolit (*Zeinlithos*) atau berarti juga batuan mendidih. Zeolit merupakan mineral hasil tambang yang bersifat lunak dan mudah kering. Warna dari zeolit adalah putih keabu-abuan, putih kehijau-hijauan, atau putih kekuning-kuningan. Zeolit terbentuk dari abu vulkanik yang telah mengendap jutaan tahun silam. Sifat-sifat mineral zeolit sangat bervariasi tergantung dari jenis dan kadar mineral zeolit.

Zeolit merupakan sekelompok mineral aluminosilikat terhidrasi dari alkalin,terutama Natrium (Na),Kalium (K),Kalsium (Ca) dan Magnesium (Mg). Hingga saat ini,telah ditemukan paling tidak 50 tipe zeolit alam dan 150 tipe zeolit sintetik. Zeolit memiliki kemampuan sebagai absorben,katalis dan penukar kation (Wikipedia Indonesia,2008). Zeolit terbentuk dari unit-unit tetrahedra AlO_4 dan SiO_4 yang merupakan kerangka dasar struktur zeolit dengan atom silikon dan aluminium sebagai pusatnya. Masing-masing tetrahedra ini dihubungkan oleh ion-ion oksigen membentuk jaringan tetrahedra tiga dimensi.

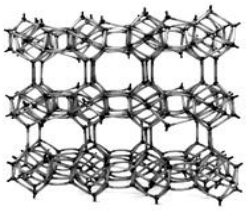
Rumus kimia zeolit secara empiris ditunjukkan sebagai berikut (Bekkum, 1991):

$$M_{x/n}.[(AlO_2)_x.(SiO_2)_y].wH_2O,$$

dimana notasi M adalah kation logam alkali atau alkali tanah, x, y, dan w adalah bilangan-bilangan tertentu sedangkan n adalah muatan dari ion logam. Dari rumus zeolit diatas dapat dilihat adanya tiga komponen yang merupakan bagian dari zeolit, yaitu:

- kerangka aluminosilikat . $[(AlO_2)_x.(SiO_2)_y]$
- Logam Alkali ($M_{x/n}$) (Be,Mg,Ca,Sr,Ba,Ra)
- Air ($_w$H2O)

Mineral zeolit yang paling umum ditemui adalah klinoptiloit, yang mempunyai komposisi kimia $(Na_3K_3)(Al_6Si_{30}O_{72}).24H_2O$. Ion Na^+ dan K^+ merupakan kation yang dapat dipertukarkan, sedangkan atom Al dan Si merupakan struktur kation dan oksigen yang akan membentuk struktur tetrahedron pada zeolit (Pusat Penelitian dan Pengembangan Tekonologi Mineral dan Batubara, 2005). Karakterisasi dengan difraksi sinar-X menunjukkan bahwa jenis zeolit sidomulyo (Lampung) adalah klinoptilolit dengan komposisi kimia adalah 76,95 % SiO_2, 8,9 % Al_2O_3, 0,12% Fe_2O_3, 1,5 % CaO, 1,21 % MgO, 1,88 % K_2O, 2,02 % Na_2O (Hendri, J. 2000). Molekul-molekul air yang terdapat dalam zeolit merupakan molekul yang mudah lepas. Akibat dari pemakaian oksigen secara bersama-sama oleh ion Al dan ion Si, maka struktur kimia yang terbentuk dari ikatan AlO_2 dan SiO_2 menjadi saling terikat satu sama lain. Bentuk zeolit secara umum dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Struktur Bangun Ruang Zeolit Klinoptilolit (*ZeoponiX, Inc. and Boulder Innovative Technologies, Inc. 2000*)

Mineral ini merupakan kelompok alumino silikat terhidrasi dengan unsur utama terdiri dari kation, alkali dan alkali tanah, berstruktur tiga dimensi serta mempunyai pori-pori yang dapat diisi oleh molekul air. Kandungan air yang terperangkap dalam rongga zeolit biasanya berkisar 10-50 %. Bila terhidrasi kation-kation yang berada dalam rongga tersebut akan terselubungi molekul air, molekul air ini sifatnya labil atau mudah terlepas. Sifat umum zeolit antara lain mempunyai susunan kristal yang agak lunak, berat jenis 2-2,4, berwarna kebiruan-kehijauan, putih dan coklat.

Bentuk batuan zeolit alam dapat dilihat pada Gambar 2 berikut ini :

Gambar 2. Zeolit (Pusat Penelitian dan Pengembangan Tekonologi Mineral dan Batubara. 2005)

B. Sifat unik zeolit

Karena sifat fisika dan kimia dari zeolit yang unik, sehingga dalam dasawarsa ini, zeolit oleh para peneliti dijadikan sebagai mineral serba guna. Sifat-sifat unik tersebut meliputi dehidrasi, adsorben dan penyaring molekul, katalisator dan penukar ion.

Zeolit mempunyai sifat dehidrasi (melepaskan molekul H_20) apabila dipanaskan. Pada umumnya struktur kerangka zeolit akan menyusut. Tetapi kerangka dasarnya tidak mengalami perubahan secara nyata. Disini molekul H_2O seolah-olah mempunyai posisi yang spesifik dan dapat dikeluarkan secara reversibel. Sifat zeolit sebagai adsorben dan penyaring molekul, dimungkinkan karena struktur zeolit yang berongga, sehingga zeolit mampu menyerap sejumlah besar molekul yang berukuran lebih kecil atau sesuai dengan ukuran rongganya. Selain itu kristal zeolit yang telah terdehidrasi merupakan adsorben yang selektif dan mempunyai efektivitas adsorpsi yang tinggi.

Kemampuan zeolit sebagai katalis berkaitan dengan tersedianya pusat-pusat aktif dalam saluran antar zeolit. Pusat-pusat aktif tersebut terbentuk karena adanya gugus fungsi asam tipe Bronsted maupun Lewis. Perbandingan kedua jenis asam ini tergantung pada proses aktivasi zeolit dan kondisi reaksi. Pusat-pusat aktif yang bersifat asam ini selanjutnya dapat mengikat molekul-molekul basa secara kimiawi. Sedangkan sifat zeolit sebagai penukar ion karena adanya kation logam alkali dan alkali tanah. Kation tersebut dapat bergerak bebas didalam rongga dan dapat dipertukarkan dengan kation logam lain

dengan jumlah yang sama. Akibat struktur zeolit berongga, anion atau molekul berukuran lebih kecil atau sama dengan rongga dapat masuk dan terjebak.

Pada aplikasinya zeolit juga banyak digunakan sebagai bahan baku *water treatment*, pembersih limbah cair dan rumah tangga, untuk industri pertanian, peternakan, perikanan, industri kosmetik dll (Pusat Penelitian dan Pengembangan Tekonologi Mineral dan Batubara. 2005).

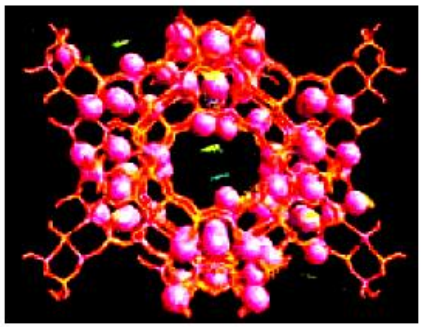
Zeolit dengan bentuknya yang menyerupai sarang lebah yang berongga mempunyai kemampuan dalam mengadsorbsi, dimana zeolit dapat digunakan untuk menyerap bermacam material. Dalam hal ini zeolit digunakan untuk menyerap N_2 dan H_2O. Zeolit dalam mengadsorbsi molekul yang diserapnya didasarkan 2 hal, yaitu : ukuran molekul dan selektifitas permukaan (Sifat dari molekul yang diadsorbsi).

(1) Ukuran molekul.

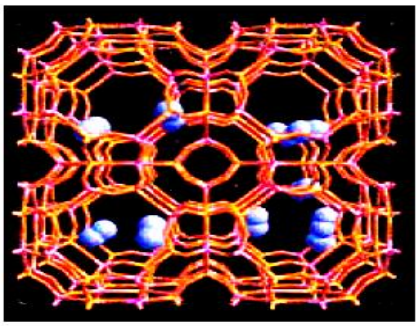
Berdasarkan ukuran molekul artinya apabila ukuran molekul adsorbat lebih besar dari ukuran pori zeolit maka molekul adsorbat tersebut tidak bisa melewati pori zeolit. Zeolit jenis klinoptilolit memiliki ukuran diameter pori 4 A^0 sedangkan dalam udara N_2 yang berbentuk elips memiliki panjang sumbu mayor 4,1 A^0 dan sumbu minor 3 A^0. O_2 yang juga berbentuk elips memiliki panjang sumbu mayor 3,9 A^0 dan minor 2,8 A^0 sehingga N_2 yang berdiameter mayor akan terikat dan tidak dapat melewati pori zeolit sedangkan N_2 yang berdiameter minor dan O_2 dengan mudah melewati pori zeolit (Bekkum, 1991).

(2) Selektifitas permukaan

Selektifitas permukaan artinya sifat dari molekul gas seperti gas N_2 yang mempunyai 4 kutub (*quadropole*) lebih mudah ditangkap oleh zeolit dibandingkan gas O_2 yang mempunyai 2 kutub (Bekkum H.V., Flanigen E.M., Jansen J.C. 1991). Kristal zeolit yang telah didehidrasi merupakan adsorben yang selektif dan mempunyai efektifitas adsorbsi yang tinggi, yaitu dapat memisahkan molekul-molekul berdasarkan ukuran dan konfigurasi molekul, dan merupakan adsorben yang selektif terhadap molekul yang polar (Bekkum, 1991). Penyaringan molekul dapat dilustrasikan seperti terlihat pada Gambar 3.



(1). Berdasarkan perbedaan ukuran molekul



(2). Sifat zeolit yang selektif terhadap molekul polar

Gambar 3. Analogi N_2 yang terikat oleh zeolit (MSI. 2005)

Disamping zeolit mempunyai kelebihan pada sifatnya, zeolit ini dapat dimodifikasi dan dapat digunakan berkali-kali. Dalam hal modifikasi, zeolit dapat juga dibuat sesuai kebutuhan baik dari segi ukuran maupun kegunaannya. Dari ukurannya zeolit dapat dibuat bentuk serbuk sampai bentuk padat lainnya sesuai keinginan dan kebutuhan sehingga cara kerja

zeolit juga dapat dimodifikasi dengan cara dealuminasi, yaitu meningkatkan silika dan meningkatkan kandungan alami *hidropobic* dari zeolit (Ribeiro F.R., Rodrigues A.E., Rollmann L.D., Naccache C. 1984 dalam Tobing M.HL. 2004).

Zeolit memiliki stabilitas termal yang tinggi, untuk zeolit alam lampung yaitu sampai 400 ºC, kerangka zeolit tidak berubah walaupun penggunaan zeolit tidak dilakukan pada lingkungan yang bersifat asam dan bersuhu tinggi (Hendri, J. 2000). Selain itu zeolit memiliki afinitas terhadap molekul-molekul baik polar maupun non polar. Zeolit dapat digunakan berulang-ulang dengan cara pemanasan untuk memindahkan material yang dijerapnya atau diletakkan pada aliran udara bertekanan untuk memindahkan material yang ditangkapnya.

C. Proses Aktivasi Fisik Zeolit Alam

Pengaktivasian zeolit alam secara fisik dilakukan dengan pemanasan. Proses pemanasan zeolit alam dilakukan pada suhu 200-400 ^{0}C dan waktu pemanasan dalam sistem vakum 2-3 jam, sedangkan jika diruang terbuka sekitar 5-6 jam (Suyartono dan Husaini,1992). Pemanasan ini bertujuan untuk menguapkan air yang terperangkap dalam pori-pori kristal zeolit sehingga jumlah pori dan luas permukaan spesifiknya bertambah.

D. Tepung Tapioka

Salah satu jenis tanaman pangan yang sudah lama dikenal dan banyak dibudidayakan oleh petani di Indonesia adalah ubi kayu (*Manihot Esculenta Crantz*). Potensi nilai ekonomis dan sosial ubi kayu merupakan bahan pangan

yang berdaya guna,bahan baku berbagai industri, dan pakan ternak. Setyadi(1987) dan Malau (2001) mendefinisikan tepung tapioka sebagai hasil ekstraksi ubi kayu yang telah mengalami pencucian secara sempurna serta dilanjutkan dengan pengeringan dan penggilingan. Komponen utama tepung tapioka adalah pati, merupakan senyawa yang tidak mempunyai rasa dan bau.

Bila pati dimasukkan dalam air panas maka molekul-molekul rantai panjang akan terurai dan campuran pati atau air akan menjadi kental (Gaman dan Sherringtom, 1994). Bila energi kinetik molekul-molekul air menjadi lebih kuat dari daya tarik menarik antar molekul pati dalam granula, air dapat masuk dalam butir-butir pati. Hal ini akan menyebabkan pembengkakan granula yang dikenal dengan istilah gelatinisasi (Winarno, 1997).

Mc Ready (1970) dalam menyatakan bahwa mekanisme gelatinisasi terjadi pada suhu 60 – 85^0 C yang mana pada temperatur inilah pati mengembang dan mengental dengan cepat dan pada saat itu tepung tapioka (pati) memiliki daya rekat yang cukup tinggi.

Tepung tapioka mempunyai banyak kegunaan baik dalam industri pangan maupun non pangan. Menurut Grace (1977), tepung tapioka maupun hasil olahannya digunakan pada industri pangan dengan berbagai tujuan, yaitu :

1. Langsung dimakan sebagai bahan makanan.
2. Sebagai pengental (*thickner*) dengan menggunakan sifat pasta tapioka (sup, saus, makanan bayi dll).
3. Sebagai pengisi (*filler*) untuk sup, pil, tablet, hasil-hasil farmasi lainnya.

4. Sebagai bahan pengikat (*binder*) untuk menggabungkan massa dan mencegahnya dari penguapan selama pemasakan (sosis dan daging olah).
5. Sebagai bahan penstabil (*stabilizer*), karena pati mempunyai sifat daya mengikat air yang tinggi, misalnya pada pembuatan es krim.

E. Motor Bakar

Motor bakar adalah alat yang berfungsi untuk mengkonversikan energi termal dari pembakaran bahan bakar menjadi energi mekanis, dimana proses pembakaran berlangsung di dalam silinder mesin itu sendiri sehingga gas pembakaran bahan bakar yang terjadi langsung digunakan sebagai fluida kerja untuk melakukan kerja mekanis. Motor bakar pada umumnya dibedakan menjadi dua bagian yaitu motor diesel dan motor bensin (Wardono, 2004)

1. Motor Diesel

Motor diesel adalah motor pembakaran dalam (*Internal combustion engine*) yang beroperasi dengan menggunakan minyak berat sebagai bahan bakar dengan suatu prinsip bahan bakar tersebut secara spontan terbakar. Motor diesel terdiri atas dua jenis yaitu motor diesel dua langkah dan motor diesel empat langkah. Mesin diesel dua langkah yang berukuran besar biasanya dipakai sebagai pembangkit daya listrik yang besar dan mesin kapal laut yang besar juga, sedangkan untuk mesin diesel yang berukuran kecil dan sedang dipakai motor bakar diesel empat langkah, dimana biasanya digunakan sebagai mesin mobil berukuran kecil dan juga

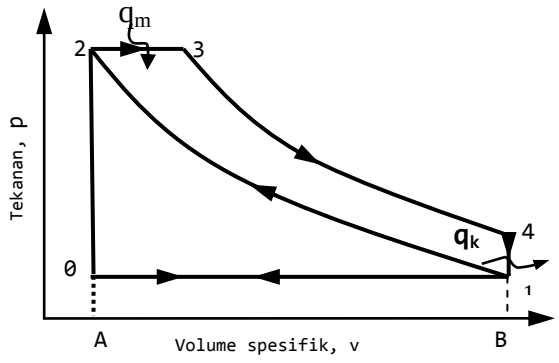
motor diesel dua langkah yang biasanya digunakan sebagai mesin traktor, truk serta bus (Maleev V.L., terjemahan Priambodo B. 1995).

Motor diesel memiliki ciri utama yaitu pembakaran bahan bakar di dalam silinder berlangsung pada tekanan konstan, dimana gas yang dihisap pada langkah hisap yang merupakan udara murni tersebut berada di dalam silinder pada waktu piston berada di titik mati atas . Bahan bakar yang masuk kedalam silinder oleh *injector* terbakar bersama dengan udara oleh suhu kompresi yang tinggi.

2. Siklus Motor Diesel

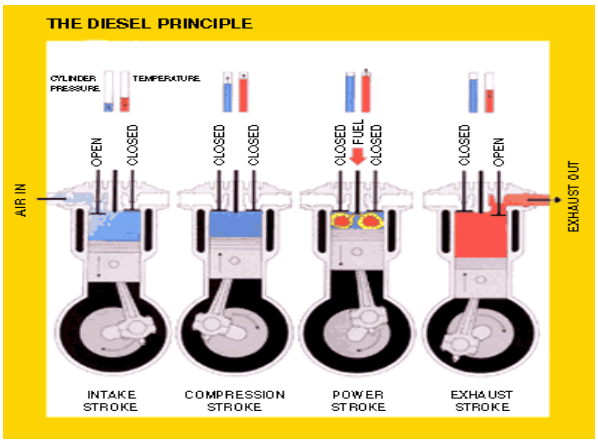
Motor bakar diesel dikenal juga sebagai motor penyalaan kompresi (*compression Ignition Engines*). Berbeda halnya dengan motor bakar bensin yang menggunakan busi untuk dapat melangsungkan proses pembakaran bahan bakar di dalam silinder, pada motor bakar diesel ini proses penyalaan dapat terjadi dengan sendiri (tanpa butuh tambahan energi dari busi). Proses pembakaran dapat terjadi di dalam silinder motor bakar diesel ini karena bahan bakar solar yang dikontakkan dengan udara terkompresi bertemperatur dan bertekanan sangat tinggi di dalam silinder, dimasukkan dengan cara disemprotkan pada tekanan tinggi, sehingga dihasilkan butir-butir bahan bakar yang sangat halus. Akibatnya, panas yang terkandung/diberikan oleh udara terkompresi tadi dapat membakar butir-butir halus bahan bakar ini. Oleh karena itu, pada motor bakar diesel ini tidak dipergunakan busi untuk memantik bahan bakar agar terbakar, seperti halnya pada motor bensin. Untuk lebih jelasnya proses-proses yang

terjadi pada motor bakar bensin ini dapat dijelaskan melalui siklus ideal dari siklus udara bahan bakar volume konstan (siklus diesel) seperti yang ditunjukan pada gambar 4 (Wardono, H. 2004).



Gambar 4. Diagram P – V dari siklus Tekanan Konstan

Proses-proses yang terjadi pada siklus udara bahan bakar tekanan konstan (siklus diesel) adalah sebagai berikut (Wardono, H.,dkk. 2004):



Gambar 5. Siklus operasi motor bakar diesel 4-langkah (Maleev, 1995).

1. langkah isap (0-1) hanya udara segar yang diisap masuk ke dalam silinder.
2. Kemudian udara segar ini dikompres pada langkah kompresi isentropik(1-2). Di akhir langkah kompresi bahan bakar (solar) diinjeksikan dalam bentuk butiran – butiran halus ke dalam silinder

menggunakan injector / atomizer bertekanan tinggi dan langsung dikontakkan dengan udara terkompres bertemperatur dan bertekanan tinggi. Sesaat kemudian campuran udara terkompres butir halus bahan bakar ini terbakar dengan sendirinya (*autoignition*).

3. Proses pembakaran (2-3) ini dianggap terjadi pada tekanan konstan. Selanjutnya sama halnya dengan proses yang berlangsung pada motor bakar bensin, yaitu terjadinya pendorongan piston dari TMA menuju TMB pada langkah ekspansi (3-4), dan diakhiri dengan langkah buang (4-1-0).

F. Proses Pembakaran

Pembakaran adalah reaksi kimia antara komponen-komponen bahan bakar (Karbon dan hidrogen) dengan komponen udara (Oksigen) yang berlangsung sangat cepat, yang membutuhkan panas awal untuk menghasilkan panas yang jauh lebih besar sehingga menaikkan suhu dan tekanan gas pembakaran. Elemen mampu bakar atau *Combustible* yang utama adalah karbon dan oksigen. Selama proses pembakaran, butiran minyak bahan bakar menjadi elemen komponennya, yaitu hidrogen dan karbon, akan bergabung dengan oksigen untuk membentuk air, dan karbon bergabung dengan oksigen menjadi karbon dioksida. Kalau tidak cukup tersedia oksigen, maka sebagian dari karbon, akan bergabung dengan oksigen menjadi karbon monoksida. Akibat terbentuknya karbon monoksida, maka jumlah panas yang dihasilkan hanya 30 persen dari panas yang ditimbulkan oleh pembentukan karbon monoksida sebagaimana ditunjukkan oleh reaksi kimia berikut (Wardono, 2004).

reaksi cukup oksigen: $C + O_2 \rightarrow CO_2 + 393.5\ kJ$,

reaksi kurang oksigen: $C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO + 110.5\ kJ$.

Keadaan yang penting untuk pembakaran yang efisien adalah gerakan yang cukup antara bahan bakar dan udara, artinya distribusi bahan bakar dan bercampurnya dengan udara harus bergantung pada gerakan udara yang disebut pusaran. Energi panas yang dilepaskan sebagai hasil proses pembakaran digunakan untuk menghasilkan daya motor bakar tersebut.

Reaksi pembakaran sebenarnya atau aktual dapat berupa seperti dibawah ini (Heywood, 1998) :

$$C_xH_y + (O_2 + 3{,}773N_2) \longrightarrow CO_2 + H_2O + N_2 + CO + NO_x + HC$$

Secara lebih detail dapat dijelaskan bahwa proses pembakaran adalah proses oksidasi (penggabungan) antara molekul-molekul oksigen (‘O’) dengan molekul-molekul (partikel-partikel) bahan bakar yaitu karbon (‘C’) dan hidrogen (‘H’) untuk membentuk karbon dioksida (CO_2) dan uap air (H_2O) pada kondisi pembakaran sempurna. Disini proses pembentukan CO_2 dan H_2O hanya bisa terjadi apabila panas kompresi atau panas dari pemantik telah mampu memisah/memutuskan ikatan antar partikel oksigen (O-O) menjadi partikel ‘O’ dan ‘O’, dan juga mampu memutuskan ikatan antar partikel bahan bakar (C-H dan/atau C-C) menjadi partikel ‘C’ dan ‘H’ yang berdiri sendiri. Baru selanjutnya partikel ‘O’ dapat beroksidasi dengan partikel ‘C’ dan ‘H’ untuk membentuk CO_2 dan H_2O. Jadi dapat disimpulkan bahwa proses oksidasi atau proses pembakaran antara udara dan bahan bakar tidak pernah akan terjadi apabila ikatan antar partikel oksigen dan ikatan antar partikel bahan bakar tidak diputus terlebih dahulu (Wardono, 2004).

G. Pengujian Kekerasan *(Hardness)*

Kekerasan didefinisikan sebagai ketahanan bahan terhadap penetrasi pada permukaannya. Kekerasan yang baik berarti bahwa bahan tahan terhadap goresan dan keausan. Kekerasan bahan dipertinggi oleh kuatnya ikatan antar molekul, tingginya kristalinitas dan ikatan silang maupun struktur tiga dimensi. Pengujian kekerasan biasanya digunakan untuk memperkirakan sifat-sifat bahan.

Terdapat tiga jenis ukuran kekerasan berdasarkan cara melakukan pengujian, yaitu: kekerasan goresan *(stracth hardness)*, kekerasan lekukan *(indentation hardness)*, kekerasan pantulan *(rebound)* (Badaruddin, 2003).

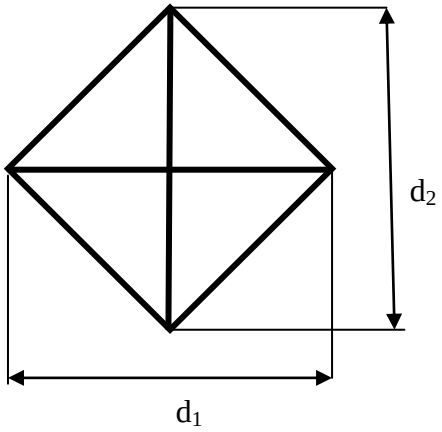
Beberapa pengujian kekerasan lekukan di antaranya metode *Brinell*, *Vickers*, *Knoop*, *Shore*, dan *Rockwell*.

1. Metode *Vickers*

Pengujian kekerasan dengan metode *Vickers* bertujuan menentukan kekerasan suatu material dalam bentuk daya tahan material terhadap intan berbentuk piramida dengan sudut puncak 136° yang ditekankan pada permukaan material uji tersebut. Angka kekerasan *Vickers* (VHN) didefinisikan sebagai hasil bagi (koefisien) dari beban uji (F) dalam Newton yang dikalikan dengan angka faktor 0,102 dan luas permukaan bekas luka tekan (injakan) bola baja (A) dalam milimeter persegi, selain itu karena bentuk penumbuknya piramid maka pengujian ini sering dinamakan uji kekerasan piramida intan

Angka kekerasan *Vickers* (VHN) didefinisikan sebagai beban dibagi luas permukaan jejak. Uji kekerasan *Vickers* dapat digunakan untuk menguji bahan yang sangat lunak dan sangat luas penggunaannya. Uji kekerasan ini memberikan hasil berupa skala kekerasan yang kontinu untuk beban tertentu, sehingga banyak dipakai pada penelitian dan lebih sesuai untuk keperluan industri.

Skema jejak indentor dapat dilihat pada gambar



Gambar 6. Skema jejak indentor.

Angka kekerasan *Vickers* (VHN) dapat ditentukan dari persamaan (Badaruddin,2004).

$$VHN = 1{,}854 \frac{P}{D^2} \quad \text{.....(1)}$$

Dimana :

VHN = Angka kekerasan Vickers (gf/µm^2)

P = Beban yang diterapkan (gf)

D = Diagonal rata-rata (µm)

$$D = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad \text{.....(2)}$$

d_1, d_2 = Panjang diagonal jejak (µm)

2. Metode *Brinell*

Pengujian kekerasan dengan metode *Brinnell* bertujuan untuk menentukan kekerasan suatu material dalam bentuk daya tahan material terhadap bola baja (identor) yang ditekankan pada permukaan material uji tersebut (*speciment*). Idealnya, pengujian *Brinnell* diperuntukan bagi material yang memiliki kekerasan *Brinnell* sampai 400 HB, jika lebih dari nilai tersebut maka disarankan menggunakan metode pengujian *Rockwell* ataupun *Vickers*.

3. Metode *Knoop*

Kekerasan yang berukuran mikro dapat ditentukan dengan metode ini. Material yang bersifat getas *(brittle)* seperti gelas dan keramik dapat diukur dengan melakukannya indentor intan berbentuk piramida dengan sudut 130° – 172°. Bentuk yang dihasilkan berupa rombohedral yang diukur kedalamannya, untuk mengetahui kekerasan material.

4. Metode *Shore*

Metode ini biasa digunakan untuk mengukur kekerasan karet atau elastomer dan plastik yang lunak seperti fluoropolimer dan vinil. Material yang akan diukur kekerasannya ditempatkan dalam suatu alat yang disebut durometer. Material ditekan oleh suatu beban yang terbuat dari baja atau intan.

5. Metode *Rockwell*

Pengujian ini adalah yang paling banyak digunakan karena cepat dan bebas dari kesalahan manusia, mampu membedakan perbedaan yang kecil

pada yang diperkeras, dan ukuran lekukannya kecil sehingga bagian yang mendapat perlakuan panas yang lengkap dapat diuji kekerasannya tanpa menimbulkan kerusakan. Pengujian kekerasan *Rockwell* merupakan metode yang paling umum digunakan karena simpel dan tidak menghendaki keahlian khusus. Digunakan kombinasi variasi indentor dan beban untuk bahan metal dan campuran mulai dari bahan lunak sampai keras.

H. Parameter Prestasi dan Operasi Motor Diesel 4 Langkah

Semakin besar daya engkol yang dihasilkan semakin baik kinerja dari motor bakar. Untuk mengetahui besarnya daya engkol dari motor bakar 4 langkah digunakan persamaan (Wardono, H dkk. 2004):

$$bP = \frac{2\pi.N.T_{AP}}{60.000},\ kW \quad \text{.....} \quad (3)$$

$$T_{AP} = 1{,}001.T_{RD},\ Nm \quad \text{.....} \quad (4)$$

Laju pemakaian bahan bakar per 8 ml Bahan Bakar, *mf* dapat diketahui dengan menggunakan persamaan berikut (Wardono, H dkk. 2004):

$$m_f = \frac{sgf \times 8.10^{-3}}{t},\ kg/jam \quad \text{.....} \quad (5)$$

Untuk pemakaian bahan bakar spesifik engkol, *bsfc* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Wardono, H dkk. 2004):

$$bsfc = \frac{m_f}{bP},\ kg/kW.detik \quad \text{.....} \quad (6)$$