

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Komposit

Material komposit adalah material yang terbuat dari dua bahan atau lebih yang tetap terpisah dan berbeda dalam level makroskopik selagi membentuk komponen tunggal sehingga dihasilkan material komposit yang mempunyai sifat mekanik dan karakteristik yang berbeda dari material pembentuknya. Komposit bersifat heterogen dalam skala makroskopik. Bahan penyusun komposit tersebut masing-masing memiliki sifat yang berbeda dan ketika digabungkan dalam komposisi tertentu terbentuk sifat-sifat baru yang disesuaikan dengan keinginan (Krevelen, 1994).

Komposit pada dunia industri merupakan campuran antara polimer (bahan makromolekul dengan ukuran besar yang diturunkan dari minyak bumi ataupun bahan alam lainnya seperti karet dan serat). Dapat dikatakan bahwa komposit adalah gabungan antara bahan matrik atau pengikat yang diperkuat. Bahan material terdiri dari dua bahan penyusun, yaitu bahan utama sebagai pengikat dan bahan pendukung sebagai penguat. Bahan penguat dapat dibentuk serat, partikel, serpihan atau dapat berbentuk yang lain (Surdia, 1992).

Bentuk (dimensi) dan struktur penyusun komposit akan mempengaruhi karakteristik komposit, begitu pula jika terjadi interaksi antara penyusun akan meningkatkan sifat dari komposit. Material komposit terdiri lebih dari satu tipe material dan dirancang untuk mendapatkan kombinasi karakteristik terbaik dari setiap komponen penyusunnya. Dibanding dengan material konvensional, bahan komposit memiliki banyak keunggulan, diantaranya memiliki kekuatan yang dapat diatur, berat yang lebih ringan, kekuatan dan ketahanan yang lebih tinggi, tahan korosi, dan tahan terhadap keausan (Bishop dan Smallman, 2000).

Pada umumnya dalam proses pembuatannya melalui pencampuran yang homogen, sehingga kita leluasa merencanakan kekuatan material komposit yang kita inginkan dengan mengatur komposisi dari material pembentuknya. Komposit merupakan gabungan antara bahan matriks atau pengikat dengan penguat (Mehta, 1986).

1. Penguat (*Reinforcement*)

Reinforcement (penguat) adalah salah satu bagian utama dari komposit yang berperan untuk menahan beban yang diterima oleh material komposit sehingga tinggi rendahnya kekuatan komposit sangat tergantung dari penguat yang digunakan. Bahan penguat biasanya kaku dan tangguh. Bahan penguat yang umum digunakan adalah jenis partikel, serat serat alam, serat karbon, serat gelas dan keramik. Ilustrasi penguat (*reinforcement*) seperti gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi *reinforcement*

Jenis-jenis material komposit berdasarkan penguatnya dibagi menjadi 3 yaitu:

- a. Komposit serat merupakan komposit yang terdiri dari serat dan bahan dasar yang difabrikasi, misalnya serat dan resin sebagai perekat.
- b. Komposit berlapis (*laminated composite*) merupakan jenis komposit yang terdiri dari dua lapis atau lebih yang digabungkan menjadi satu dan setiap lapisannya memiliki karakteristik khusus. Contohnya *polywood*, *laminated glass* yang sering digunakan sebagai bahan bangunan dan kelengkapannya.
- c. Komposit partikel (*particulate composite*) merupakan komposit yang menggunakan partikel atau serbuk sebagai penguatnya dan terdistribusi secara merata dalam matriks. Komposit yang terdiri dari partikel dan matriks seperti butiran (batu dan pasir). Partikel seharusnya berukuran kecil dan terdistribusi merata agar dapat menghasilkan kekuatan lebih seragam (Van Vlack, 1985).

2. Matriks

Matriks dalam struktur komposit berasal dari bahan polimer atau logam. Syarat pokok matriks yang digunakan dalam komposit adalah harus bisa meneruskan beban, sehingga serat bisa melekat pada matriks dan kompatibel antara serat dan matriks. Matriks dalam susunan komposit bertugas melindungi dan mengikat serat agar bekerja dengan baik. Matriks juga bergungsi sebagai pelapis serat. Umumnya matriks terbuat dari bahan-bahan lunak dan liat. Pemilihan bahan matriks dan serat memainkan peranan penting dalam menentukan sifat mekanik dan sifat komposit. Gabungan matriks dan serat menghasilkan komposit yang mempunyai kekuatan dan kekakuan yang lebih tinggi (Gibson, 1994).

Matriks adalah fasa dalam komposit yang mempunyai bagian atau fraksi volume terbesar. Matriks mempunyai fungsi sebagai berikut :

1. Mentransfer tegangan ke serat secara merata.
2. Melindungi serat dari gesekan mekanik.
3. Memegang dan mempertahankan serat pada posisinya.
4. Melindungi dari lingkungan yang merugikan.
5. Tetap stabil setelah proses manufaktur.

Komposit matriks mempunyai kegunaan yaitu sebagai berikut :

1. Matriks memegang dan mempertahankan serat pada posisinya.
2. Pada pembebanan dapat merubah bentuk dan mendistribusikan tegangan ke unsur utamanya yaitu serat.
3. Memberikan sifat : *ductility, toughnes dan electrical insulation*.

Klasifikasi matriks dalam struktur komposit dapat dibedakan menjadi :

Matriks polimer

1. Polimer merupakan bahan matriks yang paling sering digunakan.

Adapun jenis polimer yaitu :

- a. Thermoset adalah plastik atau resin yang tidak bisa berubah karena panas (tidak bisa didaur ulang). Misalnya : *epoxy, polyester, phenolic*.
- b. Termoplastik adalah plastik atau resin yang dapat dilunakkan terus menerus dengan pemanasan atau dikeraskan dengan pendinginan dan bisa berubah karena panas (bisa didaur ulang).
Misalnya : *Polyamid, nylon, polysurface*.

2. Matriks keramik

Pembuatan komposit dengan bahan keramik yaitu keramik dituangkan pada serat yang telah diatur orientasinya dan merupakan matriks yang tahan pada temperatur tinggi. Misalnya SiC dan SiN yang sampai tahan pada temperatur 1650°C.

3. Matriks logam

Matriks cair dialirkan sekeliling sistem *fiber* yang telah diatur dengan perekatan difusi atau pemanasan.

4. Matriks karbon

Fiber direkatkan dengan karbon sehingga terjadi karbonisasi, pemilihan matriks harus didasarkan pada kemampuan *elongisasi* saat patah yang lebih besar dibandingkan dengan *filler*. Perlu diperhatikan berat jenis, *viskositas*, kemampuan membasahi *filler*.

Pada komposit semakin banyak *void* (kekosongan) maka komposit semakin rapuh dan apabila sedikit *void* komposit semakin kuat. *Void* yang terjadi pada matriks sangat berbahaya, karena pada bagian tersebut *fiber* tidak didukung oleh matriks, sedangkan *fiber* selalu akan mentransfer tegangan ke matriks. Hal seperti ini menjadi penyebab munculnya *crack*, sehingga komposit akan gagal lebih awal.

Matriks berfungsi untuk mendistribusikan beban kedalam seluruh bagian penguat komposit dan sebagai pengikat bahan penguat dalam pembuatan sebuah komposit dan juga sebagai pelindung partikel dari kerusakan oleh faktor lingkungan. Matriks *polyester* paling banyak digunakan terutama untuk aplikasi konstruksi ringan, selain itu harganya murah, resin ini mempunyai karakteristik yang khas yaitu dapat diwarnai, transparan, dapat dibuat kaku dan fleksibel, tahan air, tahan cuaca dan bahan kimia. *Polyester* dapat digunakan pada suhu kerja mencapai 79°C atau lebih tergantung partikel resin dan keperluannya (Schwartz, 1984).

Keuntungan matriks *polyester* adalah mudah dikombinasikan dengan serat dan dapat digunakan untuk semua bentuk penguatan plastik. Salah satu keunggulan material komposit bila dibandingkan dengan material lainnya adalah penggabungan unsur-unsur yang unggul dari masing-masing unsur pembentuknya tersebut. Sifat material hasil penggabungan diharapkan saling melengkapi kelemahan-kelemahan yang ada pada setiap material penyusunnya (Jones, 1975).

Sifat-sifat material yang dapat diperbaharui :

- a. Kekuatan.
- b. Ketahanan korosi.
- c. Ketahanan gesek atau aus.
- d. Berat.
- e. Ketahanan lelah.
- f. Meningkatkan konduktivitas panas.
- g. Tahan lama.

B. Klasifikasi material komposit

Material komposit terdiri dari unsur-unsur penyusun dan komponen dapat berupa unsur organik, anorganik ataupun metalik dalam bentuk serat, partikel serbuk dan lapisan. Secara garis besar komposit diklasifikasikan menjadi tiga macam yaitu :

1. Komposit serat (*Fiber composite*)

Komposit serat merupakan jenis komposit yang menggunakan serat sebagai penguat atau komposit yang terdiri dari *fiber* dan matriks sebagai pengikat. Komposit yang terdiri dari satu lamina atau satu lapisan yang menggunakan penguat berupa serat atau *fiber*. Serat yang digunakan biasanya berupa serat gelas, serat karbon, serat aramid dan sebagainya. Serat ini bisa disusun secara acak maupun dengan orientasi tertentu bahkan bisa juga dalam bentuk yang lebih kompleks seperti anyaman. Peningkatan kekuatan menjadi tujuan utama, komponen penguat harus mempunyai rasio aspek yang besar, yaitu rasio panjang terhadap

diameter harus tinggi agar beban ditranfer melewati titik dimana mungkin terjadi perpatahan (Vlack L. H, 2004).

Tinggi rendahnya kekuatan komposit sangat tergantung dari serat yang digunakan, karena tegangan yang dikenakan pada komposit mulanya diterima oleh matriks akan diteruskan kepada serat, sehingga serat akan menahan beban sampai beban maksimum. Oleh karena itu serat harus mempunyai tegangan tarik dan modulus elastisitas yang lebih tinggi daripada matriks penyusun komposit (Vlack L. H, 1985).

Serat dalam bahan komposit berperan sebagai bahan utama yang menahan beban, sehingga besar kecilnya kekuatan bahan komposit sangat tergantung dari kekuatan serat pembentuknya. Semakin kecil bahan atau diameter serat yang mendekati kristal, maka semakin kuat bahan tersebut karena minimnya cacat pada material.

Serat (*fiber*) adalah suatu jenis bahan berupa potongan-potongan komponen yang akan membentuk jaringan memanjang yang utuh. Berdasarkan jenisnya, serat penguat untuk komposit dapat dibedakan menjadi dua, yaitu :

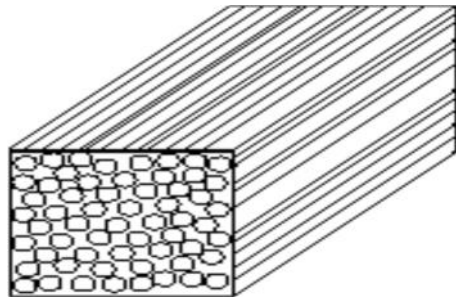
- a. Serat buatan (*Sintetic fiber*), merupakan serat penguat untuk bahan komposit yang dibuat dari bahan-bahan kimia. Contohnya : serat gelas (*fiber glass*), serat optik (*fiber optic*), serat poliester (*polyester fiber*) dan lain-lain.
- b. Serat alami (*Natural fiber*), merupakan serat penguat untuk bahan komposit yang merupakan serat alami dari hasil alam. Serat alami

dapat berasal dari hewani walaupun pada umumnya kebanyakan berasal dari tumbuh-tumbuhan. Contoh : bulu domba (hewani), serat bambu dan serat pisang (tumbuhan) dan lain-lain.

Penempatan serat dan arah serat yang tepat pada posisinya akan menjadikan komposit dapat menahan beban lebih baik. Serat dibedakan menjadi beberapa bagian seperti pada gambar 2, 3, 4 dan 5.

a. *Continuous fiber composite*

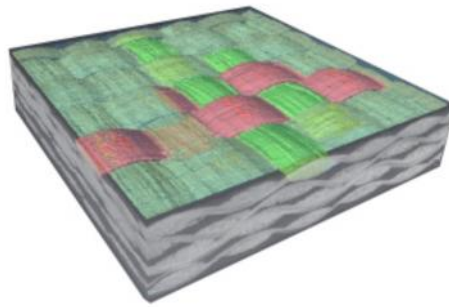
Continuous fiber composite mempunyai susunan serat panjang dan lurus, membentuk lamina diantara matriksnya dan mempunyai kelemahan pemisahan antar lapisan.



Gambar 2. *Continuous fiber composite* (Gibson, 1994)

b. *Woven fiber composite*

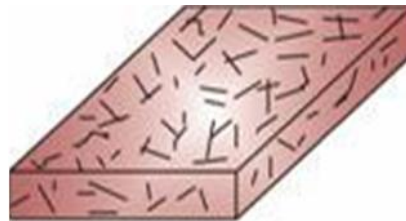
Woven fiber composite tidak mudah dipengaruhi pemisahan antar lapisan karena susunan seratnya mengikat antar lapisan. Susunan serat memanjangnya yang tidak begitu lurus mengakibatkan kekuatan dan kekakuan melemah. (komposit yang diperkuat dengan serat anyaman).



Gambar 3. *Woven fiber composite* (Gibson, 1994).

c. *Chopped fiber composite*

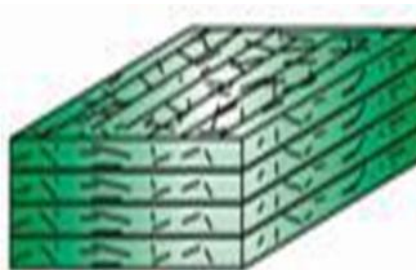
Chopped fiber composite ini diperkuat serat pendek dan serat acak.



Gambar 4. *Chopped fiber composite* (Gibson, 1994)

d. *Hybrid fiber composite*

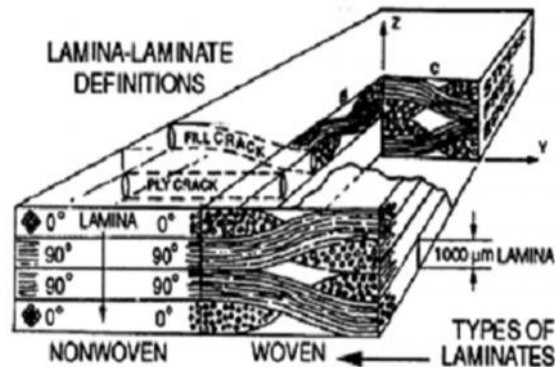
Hybrid fiber composite merupakan komposit gabungan antara serat lurus dengan serat acak. Tipe ini digunakan supaya dapat mengganti kekurangan sifat-sifat kedua tipe dan dapat menggabungkan kelebihanannya.



Gambar 5. *Hybrid composite* (Gibson, 1994)

2. Sturktural komposit (*Structute composite*)

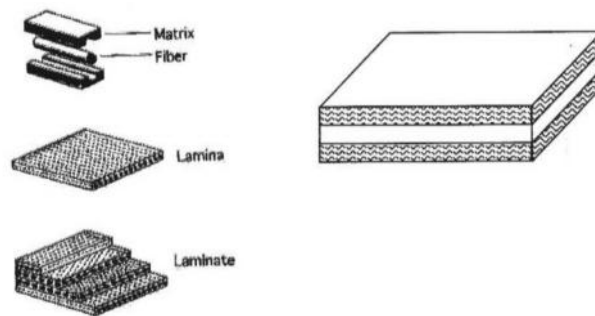
Komposit struktural merupakan srtuktur yang terdiri dari dua material atau lebih dengan sifat yang berbeda dan membentuk satu kesatuan sehingga menghasilkan sifat gabungan yang lebih baik. Mikrostruktur lamina seperti pada gambar 6.



6. Gambar Mikrostruktur lamina

1. Komposit *Laminate*

Laminate merupakan jenis komposit yang terdiri dari dua lapis atau lebih yang digabungkan menjadi satu dan setiap lapisannya memiliki karakteristik sifat sendiri. Komposit laminat ini terdiri dari empat jenis yaitu komposit serat kontinu, komposit serat anyam, komposit serat acak dan komposit serat hibrid. Komposit lamina yang serat penguatnya hanya searah pada umumnya tidak menguntungkan karena memiliki sifat yang buruk. Untuk itulah struktur komposit dibuat dalam bentuk *laminate* yang terdiri dari beberapa macam lapisan yang diorientasikan dalam arah yang diinginkan dan digabungkan bersama sebagai sebuah unit struktur. *Laminate composite* seperti pada gambar 7.



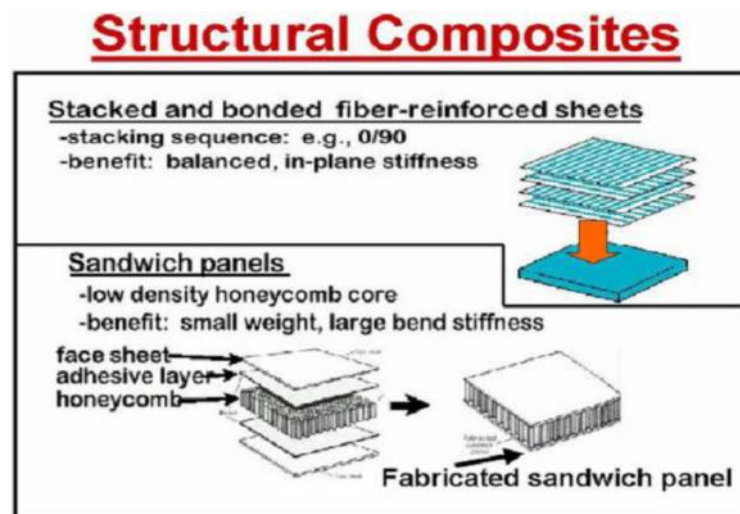
Gambar 7. *Laminate composite*

Komposit terdiri dari bermacam-macam lapisan material dalam satu matriks. Bentuk dari komposit laminat adalah :

- a. Bimetal adalah lapis dari dua buah logam yang mempunyai koefisien ekspansi termal yang berbeda. Bimetal akan melengkung seiring dengan berubahnya suhu sesuai dengan perancangan, sehingga jenis ini cocok untuk alat ukur suhu.
 - b. Pelapisan logam yang satu dengan yang lain dilakukan untuk mendapatkan sifat terbaik dari keduanya.
 - c. Kaca yang dilapisi konsep ini sama dengan pelapisan logam. kaca yang dilapisi akan lebih tahan terhadap cuaca.
 - d. Komposit lapis serat dalam hal ini lapisan dibentuk dari komposit serat dan disusun dalam berbagai orientasi serat. Komposit jenis ini biasa digunakan untuk panel sayap pesawat dan badan pesawat.
2. Komposit *sandwich*
- sandwich* merupakan komposit yang tersusun dari tiga lapisan yang terdiri dari flat komposit (*metal sheet*) sebagian kulit permukaannya (*skin*) serta material inti (*core*) dibagian tengahnya. Bagian *skin* ini

biasanya berupa lembaran *metals*, *wood*, atau *fiber composite*. Jenis *core* dapat berupa : *honeycombs*, *corrugated*, *balsa wood*, dan *cellular foams*. *sandwich* dibuat untuk mendapatkan struktur yang ringan tetapi mempunyai kekakuan dan kekuatan yang tinggi. Biasanya pemilihan bahan untuk komposit *sandwich*, syaratnya adalah ringan, tahan panas dan korosi, serta harga juga dipertimbangkan. Komposit *sandwich* merupakan jenis komposit yang sangat cocok untuk menahan beban lentur, dampak, meredam getaran dan suara. Komposit *sandwich* merupakan jenis komposit yang sangat cocok untuk struktur (Zenkert, 1999).

Structural composite sandwich panels seperti pada gambar 8.

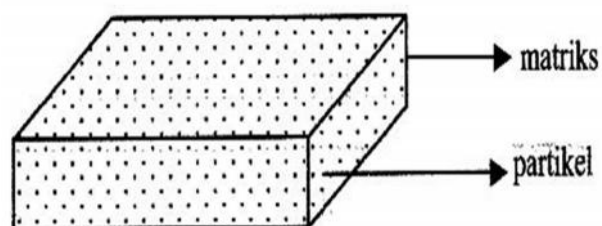


Gambar 8. *Structural composite sandwich panels*.

3. Komposit partikel (*Particulate composite*)

Komposit partikel yaitu komposit dengan penguat berupa partikel atau serbuk yang tersebar pada semua luasan dan segala arah dari komposit dan partikel yang tersuspensi di dalam matriks. Komposit mempunyai

bahan penguat yang dimensinya kurang lebih sama, seperti bulat serpih, balok, serta bentuk-bentuk lainnya memiliki sumbu hampir sama yang kerap disebut partikel. Komposit yang disusun oleh *reinforcement* berbentuk partikel, dimana interaksi antara partikel dan matriks terjadi tidak dalam skala atomik atau molekular. Partikel seharusnya berukuran kecil dan terdistribusi merata agar dapat menghasilkan kekuatan lebih seragam pada berbagai arah dan dapat meningkatkan kekuatan dan meningkatkan kekerasan material. Komposit partikel merupakan produk yang dihasilkan dengan menempatkan partikel-partikel dan sekaligus mengikatnya dengan suatu matriks bersama-sama dengan satu atau lebih unsur-unsur perlakuan seperti panas, tekanan, kelembaban, katalisator dan lain-lain. Komposit partikel ini berbeda dengan jenis serat acak sehingga bersifat isotropis. Kekuatan komposit serat dipengaruhi oleh tegangan koheren antara fase partikel dan matriks yang menunjukkan sambungan yang baik. Partikelnya bisa logam atau non logam, seperti halnya matriks. Selain itu adapula polimer yang mengandung partikel yang hanya dimaksudkan untuk memperbesar volume material dan bukan untuk kepentingan sebagai bahan penguat komposit (Jones, 1975). Komposit partikel (*Particulate composite*) seperti gambar 9.



Gambar 9. *Particulate Composite*

C. *Fly Ash* (abu terbang batubara)

Di Indonesia produksi limbah abu dasar dan abu layang dari tahun ke tahun meningkat sebanding dengan konsumsi penggunaan batubara sebagai bahan baku pada industri PLTU (Harijono D, 1993). *Fly ash* batubara adalah material yang memiliki ukuran butiran yang halus berwarna keabu-abuan dan diperoleh dari hasil pembakaran batubara. Pada pembakaran batubara dalam PLTU, terdapat limbah padat yaitu abu layang (*fly ash*) dan abu dasar (*bottom ash*). Partikel abu yang terbawa gas buang disebut *fly ash*, sedangkan abu yang tertinggal dan dikeluarkan dari bawah tungku disebut *bottom ash* (Wardani, 2008). *Fly ash* serbuk seperti gambar 10.



Menurut A costa 2009, abu terbang merupakan limbah padat hasil dari proses pembakaran di dalam *furnace* pada PLTU yang kemudian terbawa keluar oleh sisa-sisa pembakaran serta di tangkap dengan menggunakan elektrostatis *precipitator*. *Fly ash* merupakan residu mineral dalam butir halus yang dihasilkan dari pembakaran batubara yang dihaluskan pada suatu pusat pembangkit listrik. *Fly ash* terdiri dari bahan inorganik yang terdapat di dalam batubara yang telah mengalami fusi selama pembakarannya. Bahan ini memadat selama berada di dalam gas-gas buangan dan dikumpulkan menggunakan *presipitator* elektrostatis. Karena partikel-partikel ini memadat

selama tersuspensi di dalam gas gas buangan, maka partikel-partikel *fly ash* umumnya berbentuk bulat. Partikel-partikel *fly ash* yang terkumpul pada presipitator elektrostatik biasanya berukuran (0.074–0.005 mm). Bahan ini terutama terdiri dari silikon dioksida (SiO_2), aluminium oksida (Al_2O_3) dan besi oksida (Fe_2O_3).

Abu terbang batubara memiliki berbagai kegunaan yang amat beragam :

1. Penyusun beton untuk jalan dan bendungan.
2. Penimbun lahan bekas pertambangan.
3. *Recovery* magnetik, *cenosphere*, dan karbon.
4. Bahan baku keramik, gelas, batu bata, dan refraktori.
5. Bahan penggosok (*polisher*).
6. *Filler* aspal, plastik, dan kertas.
7. Pengganti dan bahan baku semen.
8. Konversi menjadi zeolit dan adsorben.

Fly ash batubara mengandung unsur kimia antara lain silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), fero oksida (Fe_2O_3) dan kalsium oksida (CaO), juga mengandung unsur tambahan lain yaitu magnesium oksida (MgO), titanium oksida (TiO_2), alkalin (Na_2O dan K_2O), sulfur trioksida (SO_3), pospor oksida (P_2O_5) dan karbon. Sifat kimia abu terbang batubara dipengaruhi oleh jenis batubara yang dibakar dan teknik penyimpanan serta penanganannya. Pembakaran batubara lignit menghasilkan abu terbang dengan kalsium dan magnesium oksida lebih banyak daripada *bituminuos*. Namun memiliki kandungan silika,

alumina, dan karbon yang lebih sedikit dari pada *bituminous* (Wardani, 2008).

Komposisi komponen utama dari abu terbang seperti pada tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia abu terbang batubara

Komponen	Bituminous	Sub-bituminous	Lignite
S_1O_2	20-60%	40-60%	15-45%
Al_2O_3	5-35%	20-30%	10-25%
Fe_2O_3	10-40%	4-10%	4-15%
CaO	1-12%	5-30%	15-40%
MgO	0-5%	1-6%	3-10%
SO_3	0-4%	0-2%	0-10%
Na_2O	0-4%	0-2%	0-6%
K_2O	0-3%	0-4%	0-4%
LOI	0-15%	0-3%	0-5%

Pembakaran batubara lignit dan subbituminous menghasilkan *fly ash* dengan kalsium dan magnesium oksida lebih banyak daripada bituminus, namun memiliki kandungan silika, alumina, dan karbon yang lebih sedikit daripada bituminous. *Fly ash* batubara terdiri dari butiran halus yang umumnya berbentuk bola padat atau berongga. Ukuran partikel abu terbang hasil pembakaran batubara *bituminous* lebih kecil dari 0,075 mm. Kerapatan abu terbang berkisar antara 2100 sampai 3000 kg/m³ dan luas area spesifiknya (diukur berdasarkan metode permeabilitas udara *Blaine*) antara 170 sampai 1000 m²/kg. Faktor-faktor yang mempengaruhi sifat fisik, kimia dan teknis dari *fly ash* adalah tipe batubara, kemurnian batubara, tingkat penghancuran,

tipe pemanasan dan operasi, metode penyimpanan dan penimbunan. Adapun sifat-sifat fisik *fly ash* bewarna : abu-abu keputihan (Marinda P, 2008).

1. Pembentukan Abu Terbang (*Fly Ash*)

Sistem pembakaran batubara umumnya terbagi dua yaitu sistem unggun terfluidakan (*fluidized bed system*) dan unggun tetap (*fixed bed system* atau *grate system*). Disamping itu terdapat sistem ketiga yaitu *spouted bed system* atau yang dikenal dengan unggun pancar. *Fluidized bed system* adalah sistem dimana udara ditiup dari bawah sehingga benda padat di atasnya berkelakuan mirip fluida. Teknik fluidisasi dalam pembakaran batubara adalah teknik yang paling efisien dalam menghasilkan energi. Pasir atau *corundum* yang berlaku sebagai medium pemanas dipanaskan terlebih dahulu. Pemanasan biasanya dilakukan dengan minyak bakar. Setelah temperatur pasir mencapai temperatur bakar batubara (300°C) maka diumpankanlah batubara. Sistem ini menghasilkan abu terbang dan abu yang turun di bawah alat. Abu tersebut disebut dengan *fly ash* dan *bottom ash*. Teknologi *fluidized bed* biasanya digunakan di PLTU.

Komposisi *fly ash* dan *bottom ash* yang terbentuk dalam perbandingan berat adalah : (80-90%) berbanding (10-20%). *Fixed bed system* atau *Grate system* adalah teknik pembakaran dimana batubara berada di atas *conveyor* yang berjalan atau *grate*. Sistem ini kurang efisien karena batubara yang terbakar kurang sempurna atau dengan perkataan lain masih ada karbon yang tersisa. Abu yang terbentuk terutama *bottom ash*

masih memiliki kandungan kalori sekitar 3000 kkal/kg. Di China, *bottom ash* digunakan sebagai bahan bakar untuk kerajinan besi (pandai besi). Teknologi *Fixed bed system* banyak digunakan pada industri tekstil sebagai pembangkit uap (*steam generator*). Komposisi *fly ash* dan *bottom ash* yang terbentuk dalam perbandingan berat adalah : (15-25%) berbanding (75-85%) (Koesnadi, 2008).

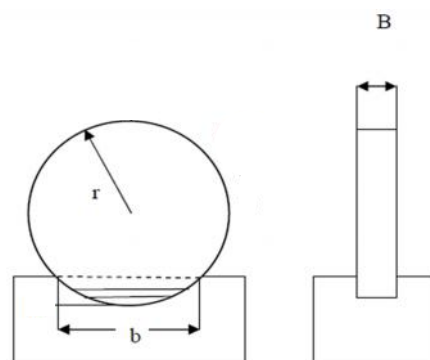
D. Keausan

Keausan dapat didefinisikan sebagai rusaknya permukaan padatan, umumnya melibatkan kehilangan material yang progresif akibat adanya gesekan (friksi) antar permukaan padatan. Definisi lain tentang keausan yaitu sebagai hilangnya bagian dari permukaan yang saling berinteraksi yang terjadi sebagai hasil gerak relatif pada permukaan. Keausan bukan merupakan sifat dasar material, melainkan respon material terhadap sistem luar (kontak permukaan). Keausan merupakan hal yang biasa terjadi pada setiap material yang mengalami gesekan dengan material lain. Material apapun dapat mengalami keausan disebabkan oleh mekanisme yang beragam. Keausan bukan merupakan sifat dasar material, melainkan *response* material terhadap sistem luar (kontak permukaan). Material apapun dapat mengalami keausan disebabkan oleh mekanisme yang beragam.

Keausan yang terjadi pada suatu material disebabkan oleh adanya beberapa mekanisme yang berbeda dan terbentuk oleh beberapa parameter yang bervariasi meliputi bahan, lingkungan, kondisi operasi, dan geometri permukaan benda yang terjadi keausan. Mekanisme keausan dikelompokkan

menjadi dua kelompok, yaitu keausan yang penyebabnya didominasi oleh perilaku mekanis dan kimia dari bahan sehingga dapat mempengaruhi kekuatan material.

Pengujian keausan dapat dilakukan dengan berbagai macam metode dan teknik, yang semuanya bertujuan untuk mensimulasikan kondisi keausan aktual. Salah satunya adalah metode Ogoshi dimana benda uji memperoleh beban gesek dari cincin yang berputar (*revolving disc*). Pembebanan gesek ini akan menghasilkan kontak antar permukaan yang berulang-ulang yang pada akhirnya akan mengambil sebagian material pada permukaan benda uji. Besarnya jejak permukaan material tergesek yang dijadikan dasar penentuan tingkat keausan pada material. Semakin besar dan dalam jejak keausan maka semakin tinggi volume material yang terkelupas dari benda uji. Ilustrasi skematis kontak permukaan antara *revolving disc* dan benda uji seperti pada gambar 11.



Gambar 11. Metode keausan ogoshi (Callister, 2003)

Dengan B adalah tebal *revolving disc* (mm), r jari-jari *disc* (mm), b lebar celah material yang terabrasi (mm), W besarnya volume material yang terabrasi (mm^3), X jarak luncur (m), dan V laju keausan mm^3/mm .

$$W = \frac{B \cdot b^3}{12 r}$$

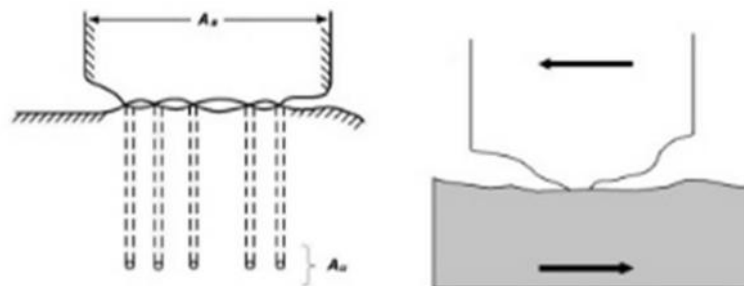
$$V = \frac{W}{X}$$

Definisi keausan yaitu hilangnya bahan dari suatu permukaan atau perpindahan bahan dari permukaannya ke bagian yang lain. Mekanisme keausan dikelompokkan menjadi dua kelompok, yaitu keausan yang penyebabnya didominasi oleh perilaku mekanis dari bahan dan keausan yang penyebabnya didominasi oleh perilaku kimia dari bahan.

1. Keausan Adesif (*Adhesive wear*)

Keausan ini terjadi jika partikel permukaan yang lebih lunak menempel atau melekat pada lawan kontak yang lebih keras, sehingga akan meninggalkan serpihan yang disebut dengan keausan. Serpihan ini dapat mempunyai kekerasan yang lebih besar dari logam induknya. Serpihan ini menyebabkan keausan *adhesive* yang terjadi pada logam induknya.

Ilustrasi metode keausan *adhesive* seperti pada gambar 12.



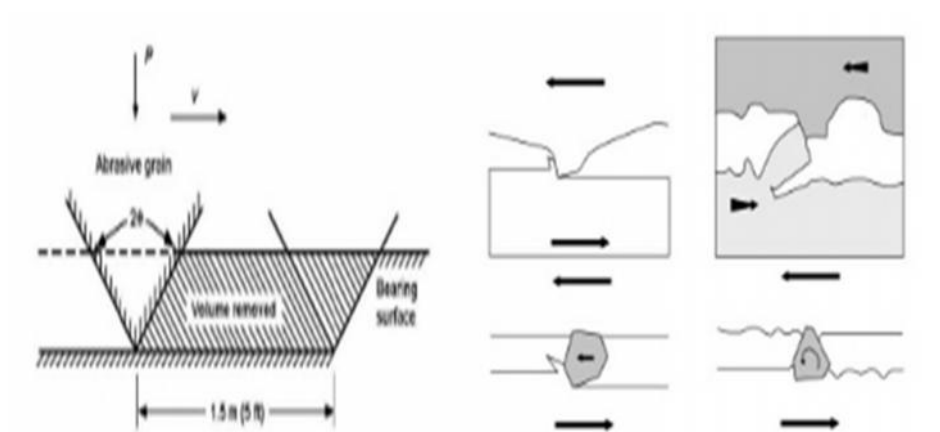
Gambar 12. Ilustrasi metode keausan *adhesive*

Faktor yang menyebabkan *adhesive wear* :

- a. Kecenderungan dari material yang berbeda untuk membentuk larutan padat atau senyawa intermetalik.
- b. Kebersihan permukaan, jumlah *wear debris* akibat terjadinya aus melalui mekanisme *adhesive* ini dapat dikurangi dengan cara menggunakan material keras dan material dengan jenis yang berbeda, misal berbeda struktur kristalnya.

2. Keausan Abrasif (*Abrasive wear*)

Keausan abrasif terjadi jika partikel keras atau permukaan keras yang kasar menggerus dan memotong permukaan sehingga mengakibatkan hilangnya material yang ada di permukaan tersebut. Mekanisme keausan *abrasive* yaitu permukaan yang kasar bergerak diantara permukaan yang lunak pada permukaan komposit. Keausan *abrasive* mengakibatkan adanya material yang pindah dari permukaan logam sehingga akan timbul celah. Ilustrasi skema keausan *abrasive* seperti pada gambar 13.



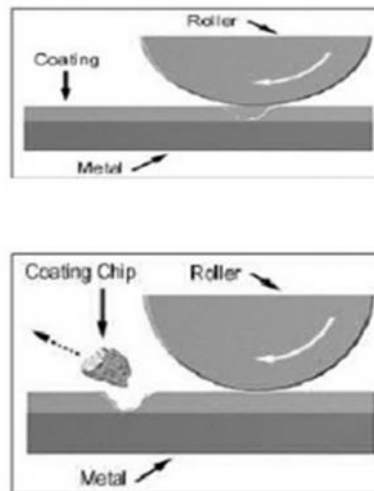
Gambar 13. Ilustrasi skema keausan *abrasive*

Tingkat keausan pada mekanisme ini ditentukan oleh derajat kebebasan (*degree of freedom*) partikel keras atau *asperity* tersebut. Sebagai contoh partikel pasir silica akan menghasilkan keausan yang lebih tinggi ketika diikat pada suatu permukaan seperti pada kertas amplas, dibandingkan bila partikel tersebut berada di dalam sistem *slurry*. Pada kasus pertama partikel tersebut kemungkinan akan tertarik sepanjang permukaan dan pada akhirnya mengakibatkan pengoyakan. Sementara pada kasus terakhir, partikel tersebut mungkin hanya berputar (*rolling*) tanpa efek abrasi. Faktor yang berperan dalam kaitannya dengan ketahanan material terhadap *abrasive wear* antara lain :

- a. Material *hardness*.
- b. Kondisi struktur mikro.
- c. Ukuran abrasif.
- d. Bentuk abrasif.

3. Keausan Lelah (*Fatigue wear*)

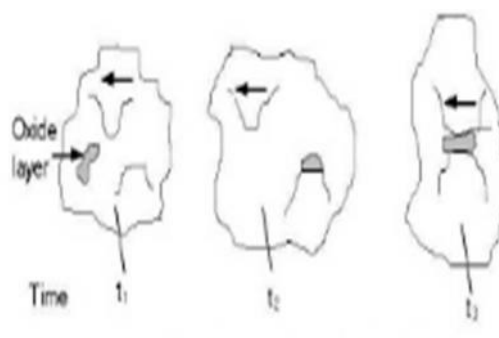
Mekanisme keausan ini didominasi akibat kondisi beban yang berulang (*cyclic loading*). Ciri-cirinya perambatan retak lelah biasanya tegak lurus pada permukaan tanpa deformasi plastis yang besar. Keausan ini terjadi akibat interaksi permukaan dimana permukaan yang mengalami beban berulang akan mengarah pada pembentukan retak-retak mikro. Retak-retak mikro tersebut pada akhirnya menyatu dan menghasilkan pengelupasan material. Tingkat keausan sangat bergantung pada tingkat pembebanan. Mekanisme keausan lelah seperti pada gambar 14.



Gambar 14. mekanisme keausan lelah

4. Keausan Korosif (*Corrosive wear*)

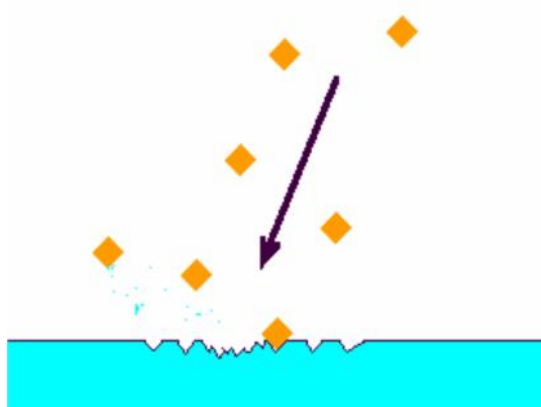
Keausan yang disebabkan perilaku kimia dimana proses kerusakan dimulai dengan adanya perubahan kimiawi material di permukaan oleh faktor lingkungan. Kontak langsung di lingkungan menghasilkan pembentukan lapisan pada permukaan dengan sifat yang berbeda dengan material induk. Sebagai konsekuensinya, material akan mengarah kepada perpatahan *interface* antara lapisan permukaan dan material induk dan akhirnya seluruh lapisan permukaan akan tercabut. Mekanisme keausan korosif seperti pada gambar 15.



Gambar 15. mekanisme keausan korosif

5. Keausan Erosi (*Erosion wear*)

Keausan erosi disebabkan oleh gas dan cairan yang membawa partikel padatan yang membentur permukaan material. Jika sudut benturannya kecil, keausan yang dihasilkan analog dengan *abrasive*. Namun, jika sudut benturannya membentuk sudut gaya normal (90°), maka keausan yang terjadi akan mengakibatkan *brittle failure* pada permukaannya, skematis pengujiannya. Mekanisme keausan erosi seperti pada gambar 16.

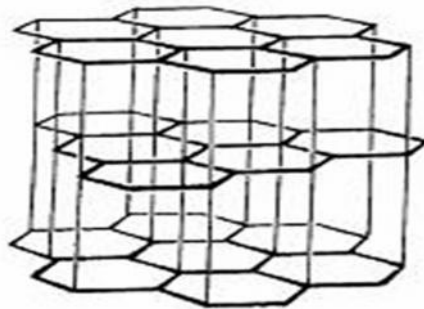


Gambar 16. Mekanisme keausan erosi

E. Grafit (*grafite*)

Grafit adalah suatu modifikasi dari karbon dengan sifat yang mirip logam yang terdiri dari atom karbon yang saling berkaitan (penghantar panas dan listrik yang baik dan bersifat rapuh). Grafit juga sebagai salah satu *friction modifiers* material yang terdiri dari atom karbon yang saling berkaitan kuat dengan membentuk struktur kristal *hexagonal*, faktor atau sifat grafit yang mempengaruhi sebagai *friction modifiers* ketahanan dan kestabilan terhadap zat-zat kimia pada temperatur tinggi, konduktivitas termal yang tinggi, koefisien ekspansi yang rendah dan ketahanan terhadap *thermal shock*. (Calliester, 2007).

Grafit teroksidasi oleh asam nitrat berasap, khlor atau oksigen dan grafit hanya dapat dilarutkan dalam besi leleh, ditinjau dari segi ketahanan terhadap korosi, grafit merupakan bahan yang bidang karena penggunaannya sangat luas, bahan tersebut tahan terhadap semua asam dan sebagian besar basa hingga di atas 100°C. Grafit memiliki sifat konduktivitas termal yang tinggi, ketahanan dan kestabilan terhadap zat-zat kimia pada temperatur tinggi, dapat terbakar pada suhu di atas 700°C dan mengandung kontaminasi material abrasif, ketahanan terhadap *thermal shock*, penambahan grafit meningkatkan ketahanan aus serta dapat mempengaruhi koefisien gesek. *Friction modifiers* berfungsi untuk memodifikasi atau mengatur nilai koefisien gesek rem secara keseluruhan, material yang dapat digunakan sebagai *friction modifiers* pada kampas rem komposit antara lain material karbon dan material organik. (Calliester, 2007). Struktur grafit seperti pada gambar 17.



Gambar 17. Struktur Grafit

Alotropi lain dari unsur karbon adalah grafit yang ditemukan di alam dalam batuan kalsium silikat serta hasil metamorfosis batu bara dan minyak bumi. ada tiga jenis grafit diantaranya :

1. *Flake* berada dalam batuan mika, skist dan gamping.

2. Kristalin berasal dari metamorfosis deposit minyak bumi dan kadar grafitnya besar dari 90%.
3. Amorf berasal dari metamorfosis batu bara akibat intrusi grafit yang menghasilkan panas bumi dan kadar grafitnya sekitar 70%.

Sifat dan kegunaan grafit diantaranya :

1. Memiliki titik leleh tinggi, sama seperti intan, hal ini disebabkan ikatan kovalen yang terbentuk sangat kuat sehingga diperlukan energi yang tinggi untuk memutuskannya.
2. Memiliki sifat lunak, terasa licin dan digunakan pada pensil setelah dicampur tanah liat.
3. Tidak larut dalam air dan pelarut organik, karena tidak mampu mensolvasi molekul grafit yang sangat besar.
4. Dibanding intan, grafit memiliki massa jenis yang lebih kecil, karena pada strukturnya terdapat ruang-ruang kosong antar lipatannya.
5. Berupa konduktor listrik dan panas yang baik, karena sifat ini grafit digunakan sebagai anoda pada baterai dan sebagai elektroda pada sel elektrolisis.

Grafit sangat lembut tapi sangat kuat, tahan terhadap panas dan pada saat yang sama konduktor panas yang baik. Ditemukan dalam batuan metamorf, tampak sebagai zat logam tapi buram dalam warna yang bervariasi dari abu-abu tua sampai hitam serta grafit berminyak, karakteristik yang membuatnya menjadi pelumas yang baik. Dalam udara grafit dapat digunakan sampai kira-kira 165°C. grafit juga digunakan sebagai bahan pengisi (Calliester, 2007).

F. Kampas rem

1. Komposisi kampas rem

Sebelum 1870, roda kendaraan masih dibuat dari kayu, dan alat yang digunakan untuk memperlambat laju roda juga terbuat dari kayu. Namun sejak 1870, roda mulai dibuat menggunakan besi untuk mengurangi keausan kayu. Pada waktu itu bidang gesek rem juga menggunakan besi. Penggunaan besi untuk bidang gesek rem ini memang membuatnya lebih awet, namun rem tidak pakem. Memasuki tahun 1897, mulai digunakan rem jenis teromol (*brake lining*) pada kendaraan. Jenis rem ini diciptakan Herber Food dari perusahaan Ferodo Ltd. Kampas yang digunakan menggunakan bahan campuran sabut dengan kain katun (*cotton belting*). Selanjutnya sekitar 1908, bahan asbestos mulai digunakan. Asbestos merupakan paduan kuningan dan serat metal yang disatukan menggunakan *binder* (bahan pengikat) namun belum dicetak. Hingga 1920, kampas rem mulai dicetak dengan serat metal dengan ukuran lebih pendek, logam kuningan yang lebih halus serta tambahan bahan organik.

Namun pada 1994, ditemukan kalau asbestos mengandung zat karsinogen yang dituding sebagai salah satu zat penyebab kanker paru-paru. Dan efek baru terasa setelah 10-15 tahun. Sejak itu, produksinya pun mulai perlahan dihentikan. Sebagai gantinya adalah penggunaan *brass*, *copper fiber* dan *aramid pulp*. Kampas rem non-asbestos ini terbagi dua, yaitu *low steel* yang masih mengandung besi meski sedikit dan *non-steel* yang tidak menggunakan besi. Bahan baku kampas rem asbestos: asbestos 40% -60%, resin 12%-15%, BaSO₄ 14%-15%, sisanya karet ban bekas, tembaga sisa

kerajinan, *frikt dust*. Bahan baku kanvas rem *non asbestos* : *aramyd/ kevlar/twaron, rockwool, fiberglass, potasiumtitanate, carbonfiber, graphite, cellulose, vemiculate, steelfiber, BaSO₄, resin, Nitrile butadine rubber* (Ari Trisianto Wibowo, 2010).

2. Material Komposit Kanvas Rem

Material-material bahan tambang berupa oksida-oksida logam seperti *Calcite, Barite, Hematite, Silikat*, dll yang sangat bermanfaat dan murah untuk pengembangan bahan tahan aus tinggi. Di samping itu pula juga memiliki potensi bahan-bahan organik alam lainnya. yang bisa dimanfaatkan sebagai resin sebagai matriks bahan komposit.

klasifikasi bahan friksi harus mengandung tipe bahan penyusun yang terdiri dari bahan pengikat, bahan serat dan bahan pengisi. Komposit bahan kanvas rem yang akan kita uji cobakan adalah komposit yang terdiri dari resin sebagai pengikat. Resin ini berfungsi untuk mengikat berbagai zat penyusun di dalam bahan tersebut. Resin sintetik yang digunakan terdiri dari dua macam yaitu termoset dan termoplastik. Bila dipanaskan perilaku kedua resin ini akan berbeda. Termoset tidak melunak sedangkan termoplastik melunak tetapi akan kembali keras setelah didinginkan. Perbedaan sifatnya ditentukan oleh struktur dalamnya. (Desi, 2008).

3. Sifat Mekanik Kanvas Rem

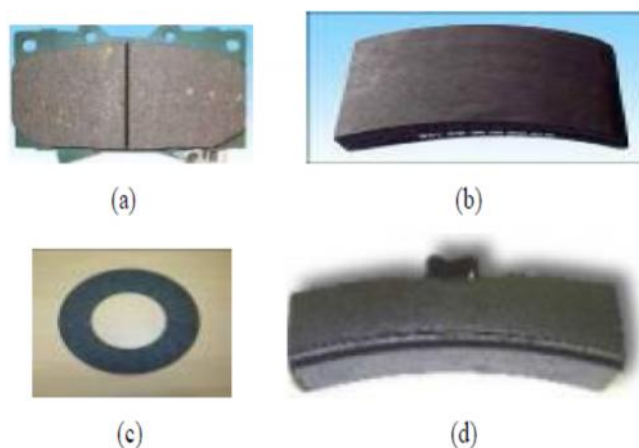
Dalam pembuatan kanvas rem karakterisasi yang perlu diperhatikan adalah keausan dan kekerasan. Kedua hal ini sangat penting karena saling

berhubungan satu sama lain. Jika kampas rem sangat keras akan mempengaruhi rotornya dan jika kampas rem cepat aus.

Dilihat dari sifat mekanik yang menyatakan kemampuan suatu bahan komponen yang terbuat dari bahan tersebut untuk menerima beban, gaya, energi tanpa menimbulkan kerusakan pada bahan/komponen tersebut. Seringkali bila suatu bahan mempunyai sifat mekanik yang baik tetapi kurang baik pada sifat yang lain, maka diambil langkah untuk mengatasi kekurangan tersebut dengan berbagai cara yang diperlukan. Untuk mendapatkan standar acuan tentang spesifikasi teknik kampas rem, maka nilai kekerasan, keausan, bending dan sifat mekanik lainnya harus mendekati nilai standar keamanannya. Karakteristik teknik dari kampas rem komposit adalah :

- a) Untuk nilai kekerasan sesuai standar keamanan 68–105 (Rockwell R).
- b) Ketahanan panas 360°C, pemakaian terus menerus sampai 250°C.
- c) Nilai keausan kampas rem adalah $(5 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{kg})$.
- d) Koefisien gesek 0,14–0,27.
- e) Massa jenis kampas rem adalah 1,5–2,4 gr/cm³.
- f) Konduktivitas thermal 0,12–0,8 W.m.°K.
- g) Tekanan Spesifiknya adalah 0,17–0,98 joule/g.°C.
- h) Kekuatan geser 1300–3500 N/cm².
- i) Kekuatan perpatahan 480–1500 N/cm².

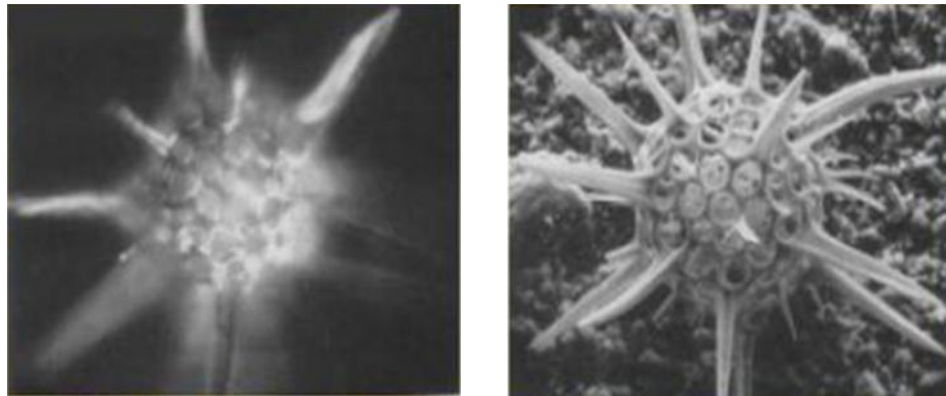
Aplikasi material gesek kampas rem dapat dilihat pada gambar 18.



Gambar 18. Aplikasi material gesek kampas rem: (a) *brake pad*,
(b) *brake lining*, (c) kopling, (d) rem kereta api

G. Uji SEM (*Scanning electron microscope*)

Scanning electron microscope adalah sebuah mikroskop yang mampu untuk melakukan pembesaran objek sampai 2 juta kali, yang menggunakan elektrostatik dan elektro magnetik untuk mengontrol pencahayaan dan tampilan gambar serta memiliki kemampuan pembesaran objek serta resolusi yang jauh lebih bagus daripada mikroskop cahaya. Elektron memiliki resolusi yang lebih tinggi dari cahaya. Cahaya hanya mampu mencapai 200 nm sedangkan elektron bisa mencapai resolusi sampai 0,1–0,2 nm. Fungsi mikroskop elektron scanning untuk memindai terfokus balok halus elektron ke sampel, elektron berinteraksi dengan sampel komposisi molekul. Energi dari elektron menuju ke sampel secara langsung dalam proporsi jenis interaksi elektron yang dihasilkan dari sampel dan menciptakan gambar tiga dimensi. Hasil perbandingan gambar mikroskop cahaya dengan mikroskop elektron seperti pada gambar 19.



(a)

(b)

Gambar 19. Perbandingan hasil gambar (a) mikroskop cahaya
(b) mikroskop elektron

Disamping itu dengan menggunakan elektron kita juga bisa mendapatkan beberapa jenis pantulan yang berguna untuk keperluan karakterisasi. Jika elektron mengenai suatu benda maka akan timbul dua jenis pantulan, yaitu pantulan elastis dan pantulan non elastis.

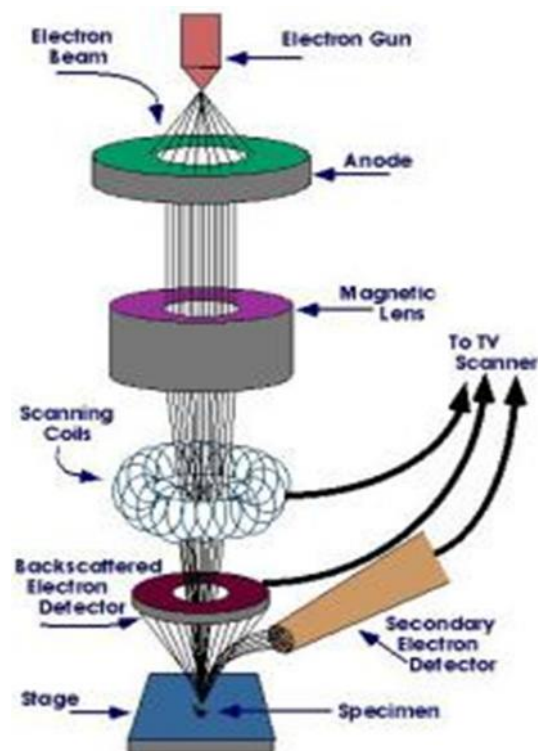
Pada mikroskop elektron SEM (*Scanning electron microscope*) terdapat beberapa peralatan utama antara lain :

1. Pistol elektron, biasanya berupa filament yang terbuat dari unsur yang mudah melepas elektron, seperti tungsten.
2. Lensa untuk elektron, berupa lensa magnetis karena elektron yang bermuatan negatif dapat dibelokkan oleh medan magnet.
3. Sistem vakum, karena elektron sangat kecil dan ringan jika ada molekul udara yang lain elektron yang berjalan menuju sasaran akan terpecah oleh tumbukan sebelum mengenai sasaran sehingga menghilangkan molekul udara menjadi sangat penting.

Prinsip kerja dari SEM (*Scanning electron microscope*) adalah sebagai berikut :

1. Sebuah pistol elektron memproduksi sinar electron dan dipercepat dengan anoda.
2. Lensa magnetis memfokuskan elektron menuju ke sampel.
3. Sinar elektron yang terfokus memindai (*scan*) keseluruhan sampel dengan diarahkan oleh koil pemindai.
4. Ketika elektron mengenai sampel maka sampel akan mengeluarkan electron baru yang akan diterima oleh detector dan dikirim ke monitor (CRT).

Secara lengkap skema SEM dijelaskan pada gambar 20.



Gambar 20. Skema uji SEM (*scanning electron microscope*)