

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian yang dilakukan oleh Prasetyo dkk, (2013) yaitu membuat bahan alternatif kampas rem yang berasal dari komposit berpengisi serat ijuk dengan penambahan MgO sebanyak 20% dan matriks *epoxyresin* sebanyak 10% dengan variasi pada *filler* pengisi yaitu serat ijuk dan serbuk kuningin berbeda-beda. Penggunaan *magnesium oksida* adalah sebagai penguat karena memiliki karakteristik yang baik, serta sebagai bahan *abrasif*. Nilai keausan yang paling mendekati dengan kampas rem pembanding yaitu sebesar $0,087 \times 10^{-7} \text{ mm}^2/\text{kg}$, dengan komposisi serat ijuk 25%, serbuk kuningin 45%, MgO 20% dan resin 10 %.

Selanjutnya pada penelitian yang dilakukan oleh Puja, (2011) bahan komposit yang digunakan yaitu serbuk dari kayu jati dimana sebelumnya dilakukan proses pengarangan terlebih dahulu pada kayu jati pada suhu 200°C memberikan kekuatan tarik tertinggi yaitu sebesar 21 (MPa) yang terjadi pada kandungan *filler* 40%. Koefesien gesek terbesar bernilai (0,79) terdapat pada komposit dengan kandungan *filler* sebanyak 54%.

Pada penelitian lain yang dilakukan oleh Arumuga dkk, (2017) yang memanfaatkan limbah industri seperti serbuk gergaji, sekam padi, *fly ash*, dan lumpur merah sebagai komposit partikulat. Pengisi juga diperkuat dengan matriks dengan fraksi berat 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40, 50% berat sebagai bahan penguat sekunder. Kemudian komposit disiapkan dengan teknik *hand-lay-up* dan sifat mekaniknya seperti kekuatan tarik, kekuatan benturan (impak), dan kekerasannya di amati. Hasil penelitian menunjukkan bahwa serbuk gergaji dan sekam padi yang diperkuat dengan matriks *polyester* memiliki hasil yang baik, kekuatan tarik keduanya meningkat 14% dan 18% dan kekuatan benturan (impak) masing-masing meningkat sebesar 61% dan 142%.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Yawas dkk, (2016) tentang pemanfaatan serbuk dari tempurung kelapa sebagai bahan alternatif lain dalam pembuatan kampas rem, untuk menggantikan kampas rem yang mengandung bahan asbes.

Dengan ukuran partikel serbuk bervariasi yaitu 125, 250, 355, 500, dan 710 μm dan penambahan resin sebanyak 35% yang dibuat dengan metode cetak tekan. Hasilnya kekuatan tekan dan kekerasan meningkat seiring dengan bentuk partikel yang semakin mengecil. Ukuran butir atau serbuk tempurung kelapa dengan dengan ukuran 125 μm menunjukkan hasil yang paling mendekati kampas rem yang ada dipasaran.

Penelitian lain yang dilakukan oleh Salim dkk, (2015) tentang pemanfaatan serbuk tempurung kelapa sebagai pengisi komposit kampas rem dengan penambahan magnesium oksida (MgO) sebanyak 30% terhadap perilaku uji tarik dan bending, yang *fabrikasi* dengan menggunakan *press* dingin. Hasil penelitian menunjukkan komposit kampas rem dengan komposisi 60% epoxyresin dan 40% serbuk tempurung kelapa dengan penambahan magnesium sebanyak 30% memiliki nilai kuat tarik yang paling baik yaitu sebesar 319,22 kPa.

2.2 Dasar Teori

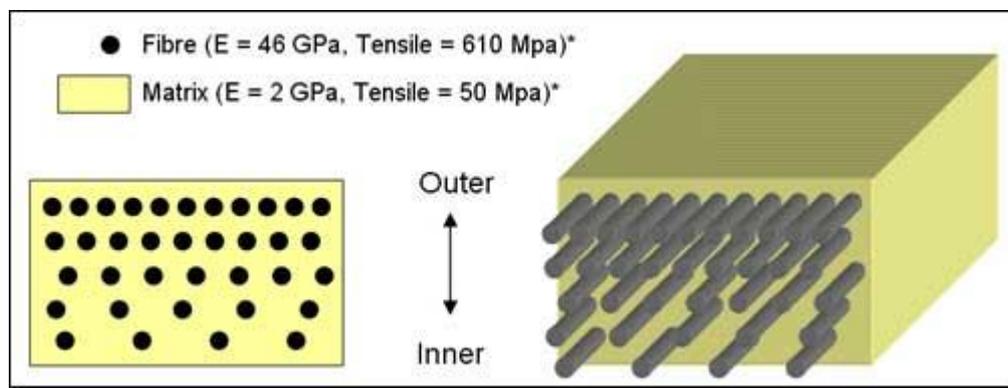
2.2.1 Pengertian Komposit

Menurut Matthews dkk. (1993), komposit adalah penggabungan antara dua buah material atau lebih, dimana sifat dari material yang membentuknya berbeda-beda. Sifat mekanik material yang baru akan dihasilkan dari pencampurnya bahan-bahan tersebut, dimana sifat-sifat tersebut dibawa dari material yang membentuknya.

Berdasarkan manual spesification standar (MSS), IPTN, tahun 1993, dinyatakan bahwa terdapat tiga karakteristik yang identik yang dimiliki oleh material komposit yaitu:

- a. Isotropik: sifat material tidak tergantung pada arah sumbu koordinat, sehingga sifat material pada arah sumbu-x, sumbu-y dan sumbu-z adalah sama. Termasuk kelompok ini adalah logam pada umumnya, komposit partikel, komposit berserat pendek dengan arah dan distribusi serat secara acak/random.

- b. Ortotropik: sifat material pada dua sumbu yang saling tegak lurus sama, sedangkan pada arah satu sumbu lainnya berbeda. Misalnya komposit serat dengan arah serat tunggal (unidireksional), yang memiliki sifat istimewa pada arah memanjang serat dengan sifat pada sembarang arah di bidang tegak lurus sumbu memanjang serat adalah sama.
- c. Anisotropik: sifat material tergantung pada arah sumbu koordinat, atau sifat material yang berbeda pada setiap arah yang berbeda. Misalnya komposit laminat yang tersusun atas lamina-lamina dengan arah yang berbeda-beda.



Gambar 2.1. Material ortotropik, pemodelan untuk bambu (<http://www.assambambooworld.com/bamboo-structural-material.htm>, diakses 04/01/18)

Dilihat dari bentuk penguatnya, komposit digolongkan kedalam tiga jenis yaitu: komposit partikel, komposit serat dan komposit lapis (Jones, 1975).

A. Komposit partikel (*particulate composites*)

Komposit partikel merupakan komposit yang dimana pengisinya atau penguatnya berupa serbuk yang tercampur merata didalam matriknya. Didalam dunia industri komposit partikel banyak dibuat sebagai bahan baku. Salah satu pertimbangan komposit akan diproduksi masal karena alasan proses produksinya yang relatif mudah. Pendekatan uji validitas dapat dilakukan untuk mengetahui kelayakan bahan komposit partikel yang telah dibuat. Modulus elastisitas dapat diketahui melalui pendekatan tersebut dalam rentang batas atas (*upper bound*) dan batas bawah (*lower bound*). Adapun persamaan matematis yang digunakan sebagai berikut :

• *Upper bound*

$$E_c = E_m V_m + E_f V_f \dots \dots \dots (2.1)$$

• *Lower bound*

$$E_c = (E_m E_f) / (V_m E_f + V_f E_m) \dots \dots \dots (2.2)$$

Dengan :

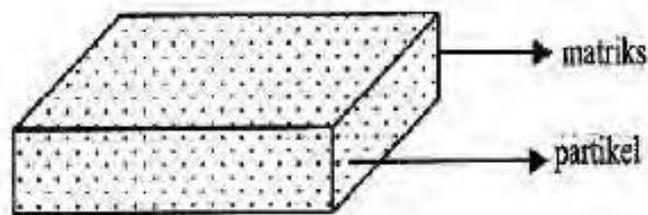
E_c = Modulus elastisitas komposit (MPa)

E_m = Modulus elastisitas matriks (MPa)

E_f = Modulus elastisitas *filler* (MPa)

V_m = Fraksi volume matriks (cm^3)

V_f = Fraksi volume *filler* (cm^3)



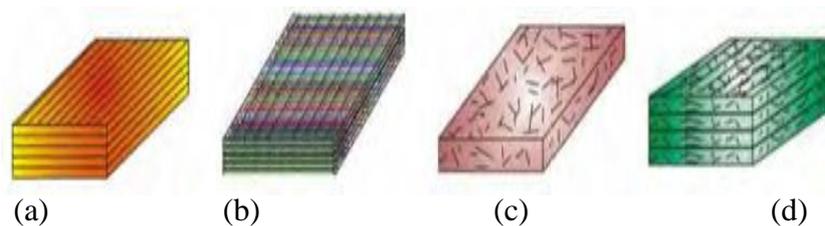
Gambar 2.2 Komposit partikel (Gibson, 1994)

B. Komposit serat (*fibrous composites*)

Komposit serat adalah komposit dimana material pembentuknya terbuat dari serat dengan matriks. Serat disini mempunyai peran sebagai penopang kekuatan dari komposit, sehingga besar kecilnya kekuatan dari komposit sangat tergantung dari serat yang digunakan. Karena tegangan yang dikenakan pada material komposit awalnya diterima oleh matrik kemudian akan diteruskan kepada serat, maka beban maksimum akan ditahan oleh serat, sehingga serat harus memiliki modulus elastisitas serta tegangan tarik yang lebih besar dibanding matrik penyusun dari komposit. Dalam memilih penguat (serat) dalam pembuatan komposit ada beberapa hal yang perlu diperhatikan diantaranya adalah harga. Ini akan menjadi hal yang penting bilamana komposit akan di produksi dalam skala yang besar.

Jenis komposit serat terbagi menjadi 4 macam yaitu

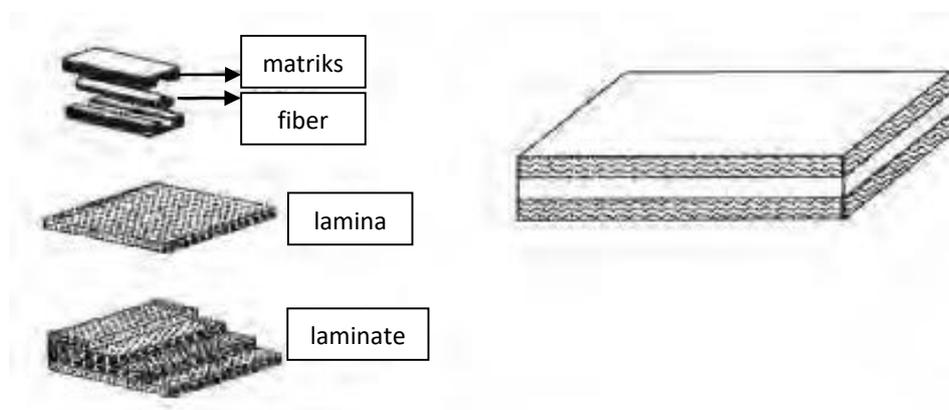
1. *Continous fiber composite* (penyusunan komposit serat secara kontinue)
2. *Woven fiber composite* (penyusunan komposit serat secara anyam)
3. *Chopped fiber composite* (penyusunan komposit serat secara pendek/acak),
4. *Hybrid composite* (penyusunan komposit serat secara kontinyu dan serat acak).



Gambar 2.3 Jenis komposit serat (a) *Continous fiber composite* , (b) *Woven fiber composite*, (c) *Chopped fiber composite*, (d) *Hybrid composite*. (Gibson, 1994)

C. Komposit lapis (*laminates composites*)

Komposit ini merupakan komposit yang terdiri dari dua lapis atau lebih kemudian digabung menjadi satu dan setiap lapisnya memiliki karakteristik sifat sendiri. Contoh dari komposit ini antara lain bimetal, pelapisan logam kaca yang dilapisi, dan komposit lapis serat.



Gambar 2.4 Komposit lapis (Gibson, 1994)

Menurut Daniel dkk, (2009) dilihat dari jenis matrik yang digunakan komposit dibagi kedalam tiga kelompok utama yaitu:

A. Komposit dengan matrik logam (*Metal Matrix Composites/ MMC*),

Komposit matrik logam (*metal matrix composites*) paling banyak digunakan pada industri otomotif, *Metal matrix composites* adalah jenis komposit yang menggunakan logam sebagai matriksnya. Bahan ini menggunakan suatu logam seperti aluminium atau yang lainnya sebagai matriks kemudian penguatnya menggunakan serat seperti silikon karbida . Sejak tahun 1996 material MMC mulai dikembangkan, pertama kali yang diteliti adalah *continous filamen* MMC yang digunakan dalam aplikasi aerospace. Contoh : aluminium dan paduannya, titanium dan paduannya, magnesium dan paduannya.

Keunggulan MMC (*Metal Matrix Composites/ MMC*) dibandingkan dengan komposit polimer yaitu :

- a. Transfer regangan dan tegangan yang baik.
- b. Tahan terhadap temperature tinggi
- c. Tidak menyerap kelembapan.
- d. Tidak mudah terbakar.
- e. Kekuatan geser serta tekan yang baik.
- f. Mempunyai muai thermal dan ketahanan aus yang lebih baik

Kekurangan MMC (*Metal Matrix Composites/ MMC*):

- a. Mahal
- b. Standarisasi material dan proses yang sedikit

Sifat Matrik pada MMC (*Metal Matrix Composites/ MMC*) :

- a. Mempunyai keuletan yang besar
- b. Mempunyai densitas yang rendah
- c. Mempunyai titik lebur yang rendah

Aplikasi MMC (*Metal Matrix Composites/ MMC*), yaitu sebagai berikut :

- a. Komponen automotive (blok-silinder-mesin,*pully*,poros gardan,dll)
- b. Peralatan militer (sudu turbin,cakram kompresor,dll)
- c. Aircraft (rak listrik pada pesawat terbang)
- d. Peralatan elektronik

B. Komposit dengan matrik keramik (*ceramic matrix composites/CMC*)

Komposit matrik keramik CMC (*ceramic matrix composites*) merupakan material 2 fasa dengan 1 fasa sebagai matrik dan 1 fasa berfungsi sebagai penguat. Bahan ini menggunakan keramik sebagai matriks yang diperkuat dengan serat pendek, atau serabut-serabut (*whiskers*) yang terbuat dari silikon karbida atau boron nitrida. CMC umumnya menggunakan *oksida*, *carbide*, dan *nitrid* sebagai bahan penguat. Salah satu proses pembuatan dari CMC yaitu dengan reaksi oksidasi leburan logam untuk pertumbuhan matriks keramik disekeliling daerah penguat atau biasa disebut dengan proses DIMOX.

Matrik yang digunakan pada CMC antara lain :

1. Alumina
2. Silikon Nitrida
3. Gelas anorganik
4. Keramik gelas

Keunggulan dari CMC :

1. Mempunyai karakteristik permukaan yang tahan aus
2. Sangat tangguh, bahkan hampir sama dengan ketangguhan dari *cast iron*
3. Memiliki dimensi yang stabil, bahkan lebih stabil dari pada logam
4. Ketangguhan dan kekuatan tinggi, serta tahan korosi
5. Tahan pada temperatur tinggi (*creep*)
6. Pada temperatur tinggi unsur kimianya stabil

Kerugian dari CMC

1. Dalam jumlah besar sulit diproduksi
2. Hanya untuk pengaplikasian tertentu
3. Mahal dan *non-cot effective*

Aplikasi CMC, antara lain sebagai berikut :

1. *Chemical processing* contohnya *seals, piping, filters, membranes liners, dan hangers*
2. Kombinasi dalam rekayasa *wiskers* SiC/alumina *polikristalin* untuk perkakas potong.
3. *Wate inineration* contohnya *heat pipes, sensors, burnes, furnacc part, dan filters*
4. *Power generation* contohnya *nozzles, heat exchange tubes, liner, vanrs, recuperators, dan combustorrs*
5. SiC/litium aluminosilikat (LAS) untuk calon material mesin panas
6. Serat grafit/gelas boron silikat untuk alas cermin laser
7. Grafit/keramik gelas untuk bantalan, perapat dan lem.

C. Komposit dengan matrik polimer (polymer matrix composites/PMC)

Komposit ini menggunakan bahan polimer sebagai matriknya. Sifat-sifat komposit polimer secara umum ditentukan oleh sifat-sifat penguat, sifat-sifat polimer, rasio penguat terhadap polimer dalam komposit (fraksi volume penguat), orientasi dan geometri penguat pada komposit.

Adapun sifat-sifat yang diperlukan komposit polimer adalah sebagai:

1. Mempunyai sifat mekanis yang bagus
2. Mempunyai daya rekat yang bagus
3. Mempunyai ketangguhan yang bagus
4. Memliki ketahanan terhadap degradasi lingkungan bagus sifat-sifat mekanis yang bagus.

Komposit polimer memiliki beberapa keuntungan, yaitu dapat dibuat dengan produksi massal, biaya yang murah, awet, ketangguhan baik, ringan, siklus pabrikasi dapat dipersingkat, kemampuan mengikuti bentuk. Adapun sifat dari PMC adalah *specific stiffness tinggi, Specific strength tinggi, Anisotropy*, ringan.

Aplikasi PMC, antara lain sebagai berikut :

- a. Serat gelas dengan matrik berbasis poliester.
 1. Peralatan rumah tangga
 2. Panel pintu kendaraan
 3. Almari perkantoran
 4. Alat-alat elektronika.
- b. Serat gelas dengan matrik berbasis termoplastik contohnya kotak air radiator.
- c. Serat karbon dengan matrik berbasis termoset
 1. Rotor dari helikopter
 2. Komponen ruang angkasa
 3. Rantai pesawat terbang

2.3 Matrik

Matrik dalam komposit berfungsi sebagai bahan pengikat serat menjadi sebuah unit struktur, melindungi dari kerusakan eksternal, meneruskan atau memindahkan beban eksternal pada bidang geser antara serat dan matrik, sehingga matrik dan serat harus saling melekat satu sama lain, disisi lain serat dan matrik juga harus bebas dari reaksi yang mengganggu (kompatible). Kegunaan matrik menurut Schwartz (1984) adalah sebagai berikut:

1. Matrik mempertahankan serta memegang serat pada posisinya.
2. Pada saat pembebanan mendistribusikan tegangan ke unsur utamanya yaitu serat dan merubah bentuk.

3. Mampu memberikan sifat tertentu, misalnya *electrical insulation*, *toughness* dan *ductility*.

2.4 Epoxy resin

Epoxy adalah suatu kopolimer, terbentuk dari dua bahan kimia yang berbeda yaitu resin dan hardener, dimana bila dicampur dengan perbandingan yang tepat akan menghasilkan massa yang padat dan dapat melekat dengan baik pada logam, kulit, kayu maupun beton. Resin ini terdiri dari polimer atau monomer rantai pendek dengan kelompok *epoxyda* pada dikedua ujungnya. *Epoxyresin* paling umum yang di hasilkan dari reaksi antara epiklorohidrin dan bisphenol-A, meskipun yang terakhir mungkin akan digantikan dengan bahan kimia yang serupa. Pengeras terdiri dari polyamine, misalnya Triethylenetetramine (teta). Menurut (Surdia, 1999) jenis epoxy ini dapat diperkuat dengan logam, keramik, bermacam-macam serat atau partikel. Adapun beberapa sifat yang terdapat pada zat epoxyresin yaitu:

1. Sifat Fisik

Seperti kebanyakan plastik, epoxyresin adalah konduktor panas yang buruk dan isolator listrik. Kecuali jika ada penambahan campuran, misalnya serbuk logam/karbon lain.

2. Sifat Kimia

Seperti kebanyakan plastik, secara kimia plastik termasuk inet. Dimana sinar ultraviolet mempengaruhi struktur kimia plastik jika dalam jangka waktu lama.

3. Sifat Mekanik

epoxyresin jika dalam bentuk asli mempunyai sifat keras dan getas. Akan tetapi dalam penggunaannya, untuk mendapatkan sifat mekanik yang baik plastik selalu dicampur dengan bahan lain. Sifat mekanik juga sangat

banyak dimodifikasi sifatnya. Baik dari segi keuletan, kekuatan, kelenturan, sampai kearah sobekan.

2.5 Serbuk Kayu Jati

Kayu jati (*Tectona grandis*) di Indonesia sudah ada sejak jaman Belanda dan oleh masyarakat sudah dimanfaatkan sebagai bahan-bahan bangunan dan mebel-mebel. Bahkan pada zaman Belanda, di Jawa tanaman tersebut telah menjadi kelas perusahaan tersendiri. Serbuk gergaji kayu jati merupakan salah satu limbah produksi yang dihasilkan dari hasil gergajian kayu yang biasa dilakukan oleh tukang kayu dari proses penggergajian kayu ataupun proses penghalusan dari kayu yang dilakukan dengan menggunakan alat penghalus kayu. Kebanyakan tukang kayu, akan langsung membuang serbuk kayu jati ataupun menumpuk dan dibiarkan begitu saja karena dianggap tidak berguna lagi. Menurut (Nurwati dkk, 2006) kayu jati memiliki sifat fisis dan mekanis yang berbeda disetiap daerahnya, seperti ditunjukkan pada tabel 2.1 dan 2.2.

Tabel 2.1 Sifat Mekanis Kayu Jati Nurwati dkk, (2006)

No	Asal daerah (Origin)		MOE		MOR		Kekerasan R	
			L	S	L	S	L	S
1	Binjai	Rata2	42330,58	35911,47	437,13	409,78	215,05	200,75
		Min	20267,92	26496,85	302,28	323,59	137,50	159,50
		Max	68292,54	45216,05	548,24	514,79	333,50	349,86
2	Sulawesi	Rata2	26534,21	20098,90	308,68	243,74	208,25	160,83
		Min	22684,27	14610,27	260,71	173,01	170,50	135,00
		Max	30384,14	28753,02	356,64	292,65	246,00	191,00
3	Parung	Rata2	-	38075,69	-	414,44	-	238,75
		Min	-	29102,86	-	322,02	-	152,00
		Max	-	45352,76	-	478,36	-	321,00
4	Kutai	Rata2	53253,32	43760,07	502,32	445,12	258,50	225,00
		Min	33426,03	43760,07	422,94	445,12	224,00	225,00
		Max	64077,86	43760,07	570,80	445,12	306,00	225,00

Keterangan : L = lokal, S = super, MOE= Modulus elastisitas, MOR = ketangguhan patah, R = Rockwel.

Tabel 2.2 Sifat Fisis Kayu Jati Nurwat dkk, (2006)

Asal daerah (Source of plant)		Kadar air (Moisture content), %		Berat jenis berdasar (Specific gravity based on)				
		Basah (green)	K. udara (Airdry)	Bb/Vb	Bku/Vku	Bko/Vko	Bko/Vku	Bko/Vb
Binjai	L	83,09	16,86	0,85	0,57	0,51	0,48	0,46
	S	99,44	16,92	0,88	0,54	0,48	0,46	0,44
Sulawesi	L	119,07	17,16	0,89	0,49	0,43	0,42	0,41
	S	76,51	17,55	0,81	0,57	0,48	0,45	0,42
Parung	S	92,69	17,36	0,87	0,56	0,50	0,49	0,47
Kutai	L	80,66	16,84	0,86	0,58	0,52	0,51	0,48
	S	53,07	16,91	0,73	0,58	0,53	0,49	0,47

Keterangan : L = Lokal, S = Super, B = Berat, b = Basah, ku = Kering Udara, Ko = Kering Oven, V = Volume (cm³)

2.6 Magnesium oksida (MgO)

Magnesium Oksida (MgO), atau magnesia, merupakan sumber magnesium (lihat juga oksida) dan suatu mineral padat higroskopis berwarna putih yang terjadi secara alami sebagai periklas. Magnesium oksida terdiri dari satu kisi ion Mg²⁺ dan ion O₂⁻ yang berpegangan melalui ikatan ionik dan memiliki rumus empiris MgO. Magnesium hidroksida terbentuk dengan adanya air (MgO + H₂O → Mg(OH)₂), tetapi sebaliknya dengan pemanasan akan melepaskan air kembali. Magnesium oksida secara historis dikenal sebagai magnesia alba (secara literatur, mineral putih ini dari Magnesia sumber lain yang memberikan magnesia alba sebagai (MgCO₃), untuk membedakannya dari magnesia negra, suatu mineral hitam yang mengandung apa yang kini dikenal sebagai mangan. Sementara yang sebenarnya “magnesium oksida” berarti senyawa MgO, magnesium peroksida MgO₂ juga dikenal sebagai senyawa metastabil. Menurut prediksi struktur kristal evolusi, MgO₂ stabil secara termodinamika pada tekanan di atas 116 GPa, dan secara total semikonduktor baru suboksida Mg₃O₂ secara termodinamika stabil di atas 500 Gpa

Adapun sifat-sifat yang dimiliki oleh magnesium oksida (MgO) seperti ditunjukkan tabel 2.3.

Tabel 2.3. Sifat-sifat magnesium oksida (MgO)

1	Memiliki Rumus molekul	MgO
2	Memiliki Berat molekul	40,3044 gr/mol
3	Memiliki Penampilan	Serbuk putih
4	Memiliki Bau	Tidak berbau
5	Memiliki Densitas	3,58 g/cm ³
6	Memiliki Titik lebur	2852 °C (5166 °F; 3125 K)
7	Memiliki Titik didih	3600 °C (6510 °F; 3870 K)
8	Memiliki Kelarutan dalam air	0,0086 gr/100 mL (30 °C)

Magnesium oksida diproduksi melalui kalsinasi magnesium karbonat atau magnesium hidroksida atau melalui pengolahan magnesium klorida dengan kapur yang diikuti dengan pemanasan. Industri refraktori sejauh ini merupakan konsumen terbesar magnesia, yang menghabiskan sebanyak 56% dari magnesium di Amerika Serikat pada tahun 2004, kemudian sisanya sebanyak 44% yang lain digunakan pada pertanian, kimia, konstruksi, lingkungan, dan aplikasi industri lainnya. (Ansrikimia, 2014).

2.7 Serbuk kuningan

Kuningan merupakan logam yang terdiri dari campuran dari tembaga dan seng. Komponen utama dari kuningan sendiri ialah tembaga, dan biasanya kuningan diklarifikasikan sebagai paduan dari tembaga. Jumlah kadar seng sendiri mempengaruhi warna dari tembaga yang biasanya memiliki warna dari colakt kemerahan gelap hingga cahaya kuning keperakan sehingga seng lebih banyak mempengaruhi warna dari kuningan tersebut. Kuningan juga mempunyai sifat yang lebih kuat dan lebih keras dari tembaga, tetapi tidak sekuat atau sekeras baja. Kuningan sangat mudah untuk dibentuk kedalam berbagai bentuk karena sifatnya yang elastis, selain itu kuningan merupakan konduktor panas yang baik, dan pada umumnya tahan terhadap korosi udara serta air garam. Karena memiliki sifat-sifat

tersebut kebanyakan kuningan digunakan untuk membuat pipa tabung, aplikasi kapal laut, sekrup, radiator, alat musik, dan *casing cartridge* untuk senjata api (Hadi Wibowo dkk, 2017).

2.8 Pengujian tarik

Pengujian tarik adalah salah satu metode yang bertujuan untuk mengetahui sifat mekanik dari suatu material (tegangan, regangan, modulus elastisitas bahan material) yang dilakukan dengan cara menarik spesimen uji sampai putus. Pengujian tarik dapat dilakukan dengan menggunakan mesin uji tarik atau dengan *universal testing* standar. Ada banyak standar uji yang digunakan dalam pengujian tarik, semuanya digunakan sesuai dengan kebutuhan pengguna. Dalam penelitian ini akan digunakan pengujian tarik dengan Standar ASTM D638-02 tipe IV.

Menurut surdia, (1999) ada beberapa hal yang mempengaruhi kekuatan tarik diantaranya adalah sebagai berikut:

- a. Temperatur, apabila temperatur naik, maka kekuatan tariknya akan turun
- b. Kelembaban, pengaruh kelembaban ini akan mengakibatkan bertambahnya absorpsi air, akibatnya akan menaikkan regangan patah, sedangkan tegangan patah dan modulus elastisitasnya menurun.
- c. Laju Tegangan, apabila laju tegangan kecil, maka perpanjangan bertambah dan mengakibatkan kurva tegangan-regangan menjadi landai, modulus elastisitasnya rendah. Sedangkan kalau laju tegangan tinggi, maka beban patah dan modulus elastisitasnya meningkat tetapi regangannya mengecil.

Hubungan antara tegangan dan regangan pada beban tarik ditentukan dengan persamaan sebagai berikut (ASTM D 3039)

$$F = \sigma \cdot A \text{ atau } \sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots[2.2]$$

Keterangan:

F = beban (N)

A = luas penampang (mm²)

σ = tegangan (MPa).

Besarnya regangan adalah jumlah dari pertambahan panjang atau (Δl) karena pembebanan kemudian dibandingkan dengan panjang daerah ukur (*gage length*). Nilai dari regangan ini adalah regangan proporsional yang didapat dengan cara membuat garis proporsional pada grafik tegangan hasil uji tarik komposit seperti ditunjukkan pada gambar 2.5.(ASTM D 3039)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_c} \dots\dots\dots [2.3]$$

Keterangan:

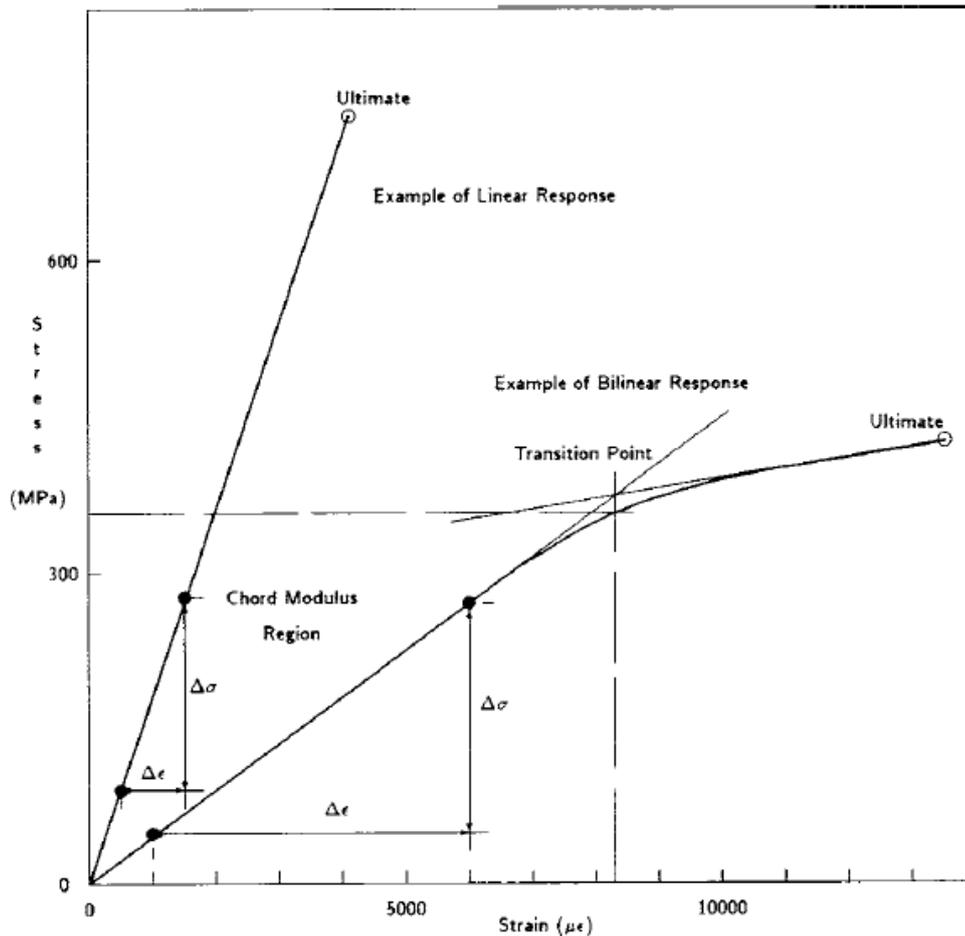
ε = Regangan (mm/mm)

ΔL = pertambahan panjang (mm)

L_c = panjang daerah ukur (*gage length*), (mm)

Daerah proporsional merupakan daerah dimana tegangan regangan yang terjadi masih sebanding, sehingga defleksi yang terjadi masih bersifat elastis dan masih berlaku hukum Hooke.

Besarnya nilai dari modulus elastisitas komposit juga merupakan perbandingan antara tegangan dan regangan pada daerah proporsional dapat dihitung dengan persamaan (ASTM D 3039).



Gambar 2.5 Grafik hubungan tegangan dengan regangan (ASTM D 3039)

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\Delta F/A}{\Delta L/L_0} \dots\dots\dots [2.4]$$

Dimana:

E = Modulus elastisitas tarik (MPa)

σ = Kekuatan tarik (MPa)

ε = Regangan (mm/mm)

2.9 Karakteristik Patahan pada Material Komposit

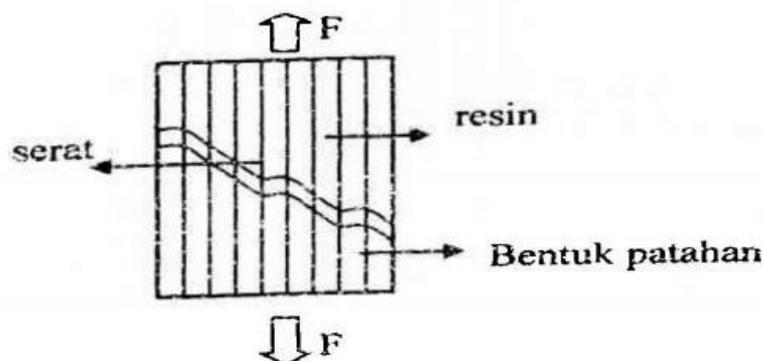
Kegagalan dari bahan teknik sebisa mungkin harus dihindari karena beberapa alasan seperti bisa menghasilkan kerugian dibidang ekonomi, membahayakan

hidup manusia, dan gangguan terhadap ketersediaan produk dan jasa. Patah didefinisikan sebagai pemisahan sebuah bahan menjadi dua atau lebih potongan sebagai respon dari tegangan static yang berkerja dan pada temperature yang relative rendah terhadap temperature cairnya. Berdasarkan kemampuan bahan mengalami deformasi plastic model patah diklasifikasikan menjadi dua, yaitu model patah liat (*ductile fracture*) dan patah getas (*brittle fracture*). Pada patahan yang bersifat liat (*ductile*) material menyerap energi yang besar sebelum patah ang diperlihatkan oleh deformasi plastik, sedangkan pada patahan material yang memiliki sifat getas hanya memperlihatkan deformasi kecil atau bahkan tidak ada.

Jenis patahan pada material komposit antara lain sebagai berikut:

a) Patah banyak

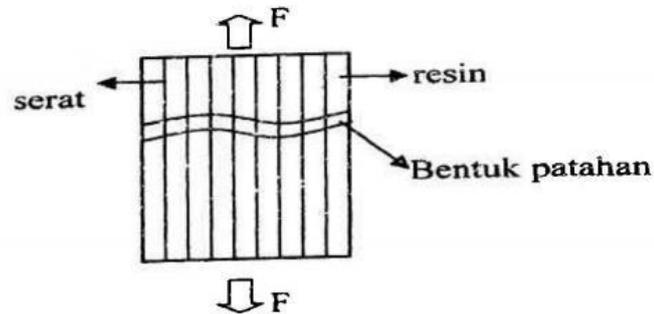
Menurut Chawla (1987), ketika jumlah serat yang putus akibat beban tarik masih sedikit dan kekuatan interface masih baik, resin mampu mendukung beban yang diterima dengan mendistribusikan beban tersebut ke sekitarnya. Apabila resin mampu menahan gaya geser dan meneruskan beban keserat yang lain maka jumlah serat yang putus semakin banyak. Patahan terjadi lebih dari satu bidang.



Gambar 2.6 Patah banyak (Schwartz, 1984)

b) Patah tunggal

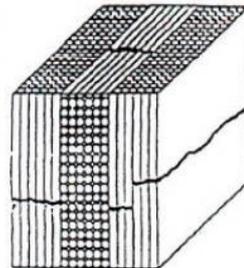
Menurut Chawla (1987), patah yang disebabkan ketika serat putus akibat beban tarik, resin tidak mampu menerima lagi beban tambahan. Patah terjadi satu bidang kontak.



Gambar 2.7 Patah tunggal (Schwartz, 1984)

c) Deliminasi

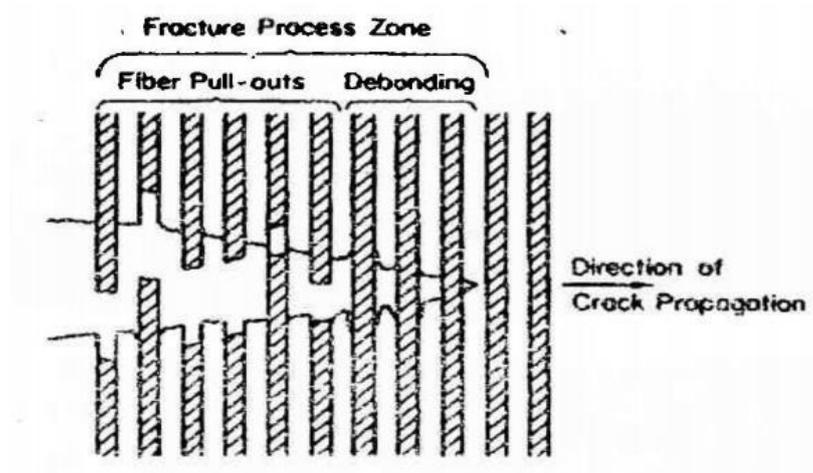
Deliminasi (*interlaminar*) adalah perpatahan yang terjadi akibat terlepasnya ikatan antar lapisan penguat. Penyebab utama perpatahan ini adalah gaya adhesi antara penguat dan matriks yang lemah. Selain itu kemampuan matriks untuk mengisi ruang antara serat juga mempengaruhi.



Gambar 2.8 Deliminasi (Schwartz, 1984)

d) *Fiber pull out*

Fiber pull out adalah tercabutnya serat dari resin yang disebabkan ketika resin retak akibat beban tarik, kemampuan untuk menahan beban akan segera berkurang. Namun, komposit masih mampu menahan beban walau beban yang ditahan relatif kecil dari beban maksimal. Saat resin retak, beban akan ditransfer dari resin keserat di tempat persinggungan retak. Kemampuan untuk mendukung beban berasal dari serat. Seiring dengan bertambahnya deformasi, serat akan tercabut dari resin (akibat debonding dan patahnya serat).



Gambar 2.9 Fiber pull out (Schwartz, 1984)

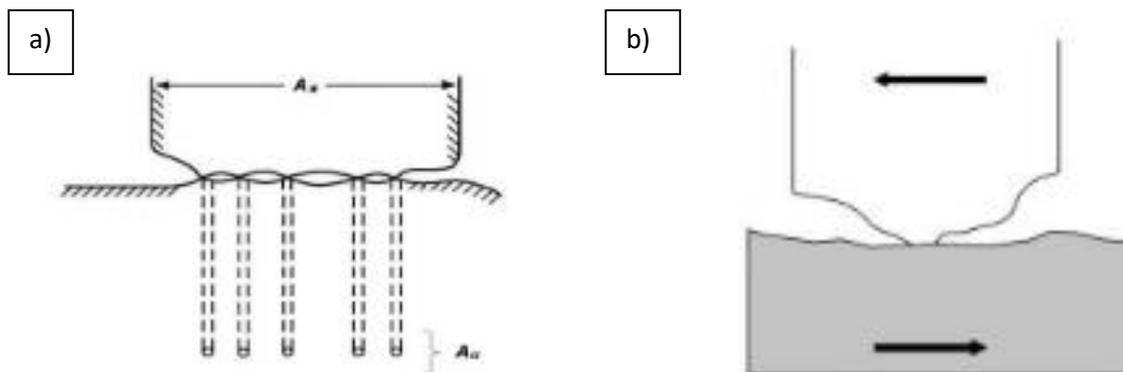
2.10 Uji keausan

Secara umum keausan (*wear*) didefinisikan sebagai kerusakan pada permukaan padat yang disebabkan oleh hilangnya atau perpindahan material akibat gaya mekanik dari sebuah hubungan padat (*solid*), cair (*liquid*), atau gas. Hingga saat ini terminologi dari keausan masih belum pasti serta definisi dasar tentang keausan masih belum distandarkan. Walaupun demikian telah diterima secara luas bahwa pada dasarnya ada tiga jenis keausan yaitu keausan adhesi (*adhesive wear*), keausan abrasif (*abrasive wear*) dan keausan erosi (*erosive wear*). Selain itu ada beberapa jenis keausan lagi yang terpisah (jenis ini bukan jenis yang utama), yaitu kelelahan permukaan (*surface fatigue*), keadaan teriritasi (*fretting*) dan erosi kavitasi (*cavitation erosion*) (Hamzah dkk, 2008).

Berikut penjelasan singkat tentang jenis keausan:

1. Keausan *adhesive* (*Adhesive wear*)

Keausan *adhesive* terjadi akibat kontak permukaan dari dua jenis material atau lebih yang mengakibatkan adanya perlekatan antara satu dengan lainnya (*adhesive*) serta deformasi plastis yang pada akhirnya akan terjadi pelepasan atau pengoyakan dari salah satu material seperti yang di perlihatkan pada gambar 2.9 dan 2.10 berikut:



Gambar 2.10 a) Ilustrasi Skematis Keausan *Adhesive* Metode *Adhesive* (Nurdiansyah, 2014) **Gambar 2.11** b) Keausan

Beberapa faktor yang dapat menyebabkan *adhesive wear* adalah sebagai berikut:

1. Kebersihan dari permukaan material.
2. Kecenderungan dari material yang berbeda untuk membentuk senyawa intermetalik atau larutan padat.

Jumlah *wear debris* akibat terjadinya aus melalui mekanisme *adhesif* ini dapat dikurangi dengan cara sebagai berikut:

1. Menggunakan material dengan jenis yang berbeda, misalnya berbeda yang struktur kristalnya atau yang lainnya.
2. Menggunakan material yang bersifat keras

1. Keausan Abrasif (*Abrasive wear*)

Keausan abrasif terjadi apabila suatu partikel keras (*asperity*) dari salah satu material tertentu meluncur pada permukaan material lain yang lebih lunak, sehingga pemotongan material yang lebih lunak atau penetrasi, dapat dilihat pada Gambar 2.12 di bawah ini. Derajat kebebasan (*degree of freedom*) partikel keras atau *asperity* akan mempengaruhi tingkat dari keausan pada mekanisme ini.

Sebagai contoh partikel pasir silica yang diikat pada suatu permukaan seperti pada kertas amplas akan menghasilkan keausan yang lebih tinggi, dibandingkan jika partikel tersebut berada di dalam sistem *slurry*. Pada kasus yang pertama

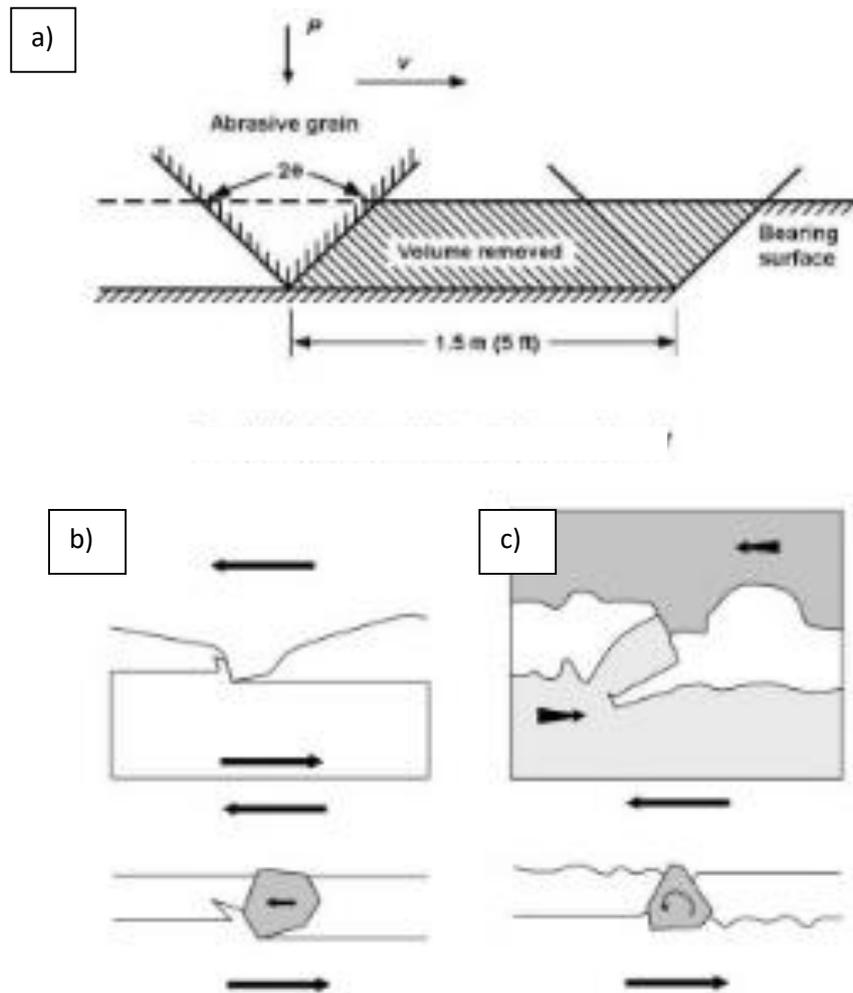
ditunjukkan `gambar 2.12 (a), kemungkinan partikel tersebut akan akan mengalami penarikan sepanjang permukaan sehingga akhirnya mengakibatkan pengoyakan. Sementara pada kasus yang terakhir ditunjukkan pada gambar 2.12 (b) dan (c), partikel tersebut mungkin hanya berputar (*rolling*) tanpa efek abrasi.

Beberapa faktor yang memiliki peran dengan ketahanan material terhadap *abrasive wear*:

1. Bentuk material
2. Ukuran abrasif material
3. Kondisi struktur mikro suatu material
4. Kekerasan material (*hardness*)

Beberapa bentuk dari kerusakan permukaan akibat dari *abrasive wear*, antara lain:

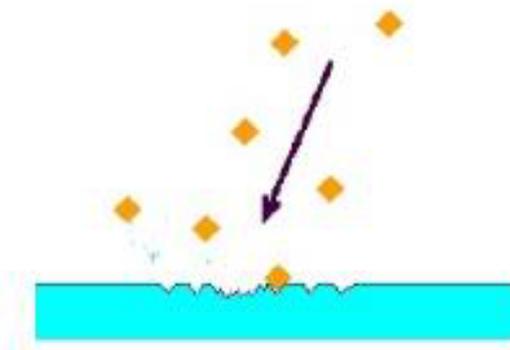
1. *Gouging*
2. *Scratching*
3. *Scoring*



Gambar 2.12 keausan metode abrasif (Nurdiansyah, 2014)

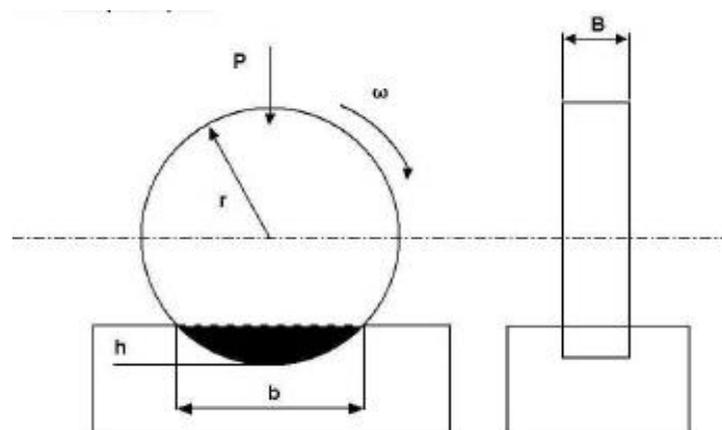
3. Keausan Erosi (*Erosion wear*)

Keausan erosi merupakan proses keausan disebabkan oleh cairan dan gas yang membawa partikel berupa padatan yang kemudian pada membentur permukaan material. Jika keausan yang dihasilkan analog dengan abrasif maka sudut benturannya kecil. Namun, jika keausan yang terjadi merupakan brittle failure pada permukannya maka kemungkinan sudut benturannya membentuk sudut gaya normal (90 derajat), terlihat pada gambar 2.13 di bawah ini bentuk skematisnya:



Gambar 2.13 Metode keausan erosi (Nurdiansyah, 2014)

Ada berbagai macam metode dan teknik dalam pengujian keausan, dengan maksud tujuan untuk mensimulasikan kondisi keausan aktual (Surdia,1999). Pada penelitian ini benda uji memperoleh beban gesek dari cincin yang berputar (*revolving disc*) yang biasa disebut dengan metode pengujian *Ogoshi*. Pemberian pembebanan gesek yang terus menerus dan berulang akan mengakibatkan kontak antara permukaan material yang mengalami gesekan, kemudian penentuan tingkat keausan pada material diukur berdasarkan besarnya jejak permukaan dari material yang tergesek. Semakin tinggi volume material yang terkelupas dari benda uji maka semakin besar pula jejak keausannya. Berikut merupakan skematis dari kontak antara permukaan benda uji dan permukaan *revolving disc* :



Gambar 2.14 Pengujian keausan dengan menggunakan metode *ogoshi*
(Nurdiansyah, 2014)

Dengan keterangan:

Po : Beban (Kg).

h : Kedalaman bekas injakan (mm).

r : Jari- jari revolving disk (10,85 mm).

b : Lebar bekas injakan (mm).

B : Tebal *revolving disk* (mm).

ω : Kecepatan putar (1430 rpm).

Untuk mengetahui keausan spesifik diukur dengan menghitung lebar keausan pada benda uji yang dilakukan oleh piringan pengaus yang berputar.

Keausan spesifik dihitung dengan persamaan :

$$W_s = \frac{B \cdot b_o^3}{8 \cdot r \cdot P_o \cdot L_o} \left(\frac{mm^2}{kg} \right) \dots \dots \dots (2.5)$$

Ws = Keausan spesifik (mm²/kg)

B = Lebar piringan pengaus (mm)

bo = Lebar keausan spesimen (mm)

r = Jari jari piringan pengaus (mm)

Po = Gaya tekan pada proses keausan (kg)

Lo = Jarak tempuh pada proses pengausan (m)

2.11 Pengujian kekerasan

Kekerasan adalah ukuran ketahanan suatu material terhadap deformasi plastis lokal. Nilai kekerasan tersebut dihitung hanya pada tempat dilakukannya pengujian tersebut (lokal), sedangkan pada tempat lain bisa jadi kekerasan suatu material

berbeda dengan tempat yang lainnya. Tetapi nilai kekerasan suatu material adalah homogen secara teoritik akan sama untuk tiap-tiap titik.

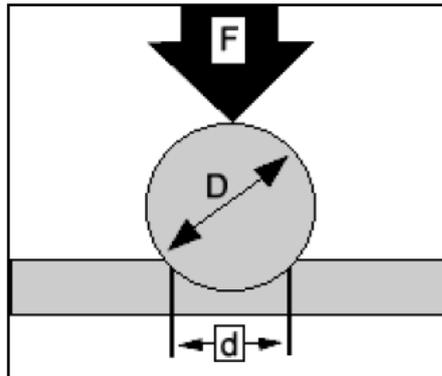
2.11.1 Pengujian kekerasan *Brinell*

Pengujian kekerasan Brinell menggunakan penumbuk (penetrator) yang terbuat dari bola baja yang diperkeras (tungsten carbide). Diameter bola adalah 2,5, 5, dan 10 mm, lihat gambar dan beban standar antara 100 dan 3000N. Selama pembebanan, beban ditahan 10 sampai 15 detik. Pemilihan beban tergantung dari kekerasan material, semakin keras material maka beban yang diterapkan juga semakin besar. Pengujian kekerasan dengan metode Brinell bertujuan untuk menentukan kekerasan suatu material dalam bentuk daya tahan material terhadap bola baja (identor) yang ditekan pada permukaan material uji tersebut (specimen). Mengenai lama pengujian itu tergantung pada material yang akan diuji. Untuk semua jenis baja lama pengujian adalah 10 detik sedang untuk material bukan besi lama pengujian adalah 15 detik. Besar pemberian pembebanan bergantung kepada *ball indentor* yang digunakan, menurut ASTM E10 pemberian pembebanan seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.4.

Tabel 2.4 Gaya yang diterapkan menurut ASTM E10:

	Force-diameter ratio (F/D ²)				
D (mm)	30	10	5	2,5	1
10	3000	1000	500	250	100
5	750	250	125	62,5	25
2,5	187,5	62,5	31,25	15,625	6,25
1	30	10	5	2,5	1
	A	B	C	D	E

A: Steels and iron alloys; B: Heat treated Cu/Al light alloys; C: No heat treated Cu/Al light alloys; D-E : soft metallic materials.



Gambar 2.15 Bentuk indenter *brinell* (ASTM E10)

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan :

HB = *Brinell hardness number*

F = Beban yang diberikan (kg)

D = Diameter indenter (mm)

d = Diameter lekukan rata-rata hasil indentasi (mm)

2.12 Rem

Rem digunakan untuk mengendalikan putaran poros, terutama untuk menurunkan putaran. Bagian utama rem terdiri atas bagian yang berputar, bagian yang tetap, dan elemen gesek yang dipasangkan pada masing-masing permukaan yang akan digesekkan satu sama lain. Selanjutnya, untuk pelayanannya, dibuatlah tuas-tuas dan mekanisme pelayanan sehingga pelayanannya mudah dan tidak terlalu memerlukan gaya pelayanan yang besar. Menurut (Jossy, 2011) rem adalah komponen yang mengubah energi mekanik menjadi energi thermal / panas melalui gesekan antara kampas rem dengan tromol ataupun cakram. Semakin cepat suatu kendaraan maka diperlukan kapasitas sistem pengereman yang efektif pula agar kendaraan menjadi aman.

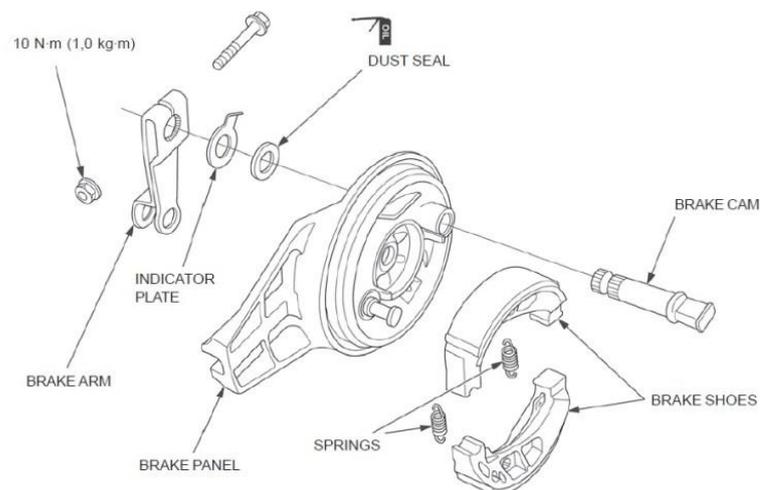
Berikut beberapa faktor yang mempengaruhi kapasitas rem (Jossy (2011) :

1. Tekanan antara permukaan bidang pengereman dengan kampas rem.
2. Koefisien gesek bidang yang mengalami pengereman dengan kampas rem
3. Area pengereman (bidang gesek).
4. Batas dari kecepatan motor
5. Kemampuan kampas rem dalam menyerap panas yang diakibatkan dari gesekan antara kampas rem dengan bidang pengereman.

Berdasarkan konstruksinya rem terbagi atas 2 jenis yaitu : 1) Rem tromol (*brake drum*), dan 2) Rem cakram (*disc brake*).

1. Rem tromol (*brake drum*)

Rem tromol adalah salah satu konstruksi rem yang cara pengereman kendaraan dengan menggunakan tromol (brake drum), sepatu rem (brake shoe), dan silinder roda (wheel cylinder). Pada dasarnya tromol yang berputar ketika pengereman sepatu rem yang di dalam tromol akan bersentuhan di bagian dalam tromol dan menimbulkan gesekan (Andun, 2005).



Gambar 2.16 Rem tromol (<https://motogokil.com/2014/06/17/diy-mengatasi-permasalahan-di-rem-tromol-sepeda-motor/rem-tromol-belakang-4/>, diakses tanggal 20 Mei 2018)

Keuntungan : Ringkas dan tidak memerlukan ruang yang besar. Untuk pengendalian daya yang besar, pelayanan bisa dilakukan secara hidrolik sehingga dengan gaya pelayanan yang kecil bisa dibangkitkan gaya penekanan yang cukup besar untuk melakukan pengereman.

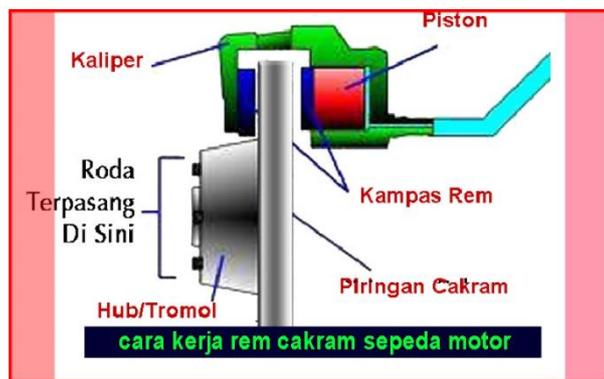
Kekurangannya: Karena bgiannya-bagiannya biasanya ditutup oleh drumnya, maka sirkulasi udara di sekitar kontak pengereman kurang memadai sehingga pembuangan kalor yang dibangkitkan dari pengereman menjadi agak lambat. Dibandingkan dengan rem pita dan rem blok, konstruksinya lebih kompleks.

2. Rem Cakram (*Disk Brake*)

Hampir sebagian besar industri otomotif saat ini menggunakan rem cakram dalam sistem pengeremannya dan ini sudah menjadi standar pada kendaraan dengan model terbaru. Pada rem cakram umumnya terdiri atas berbagai komponen diantaranya yaitu cakram (*disc rotor*) bagian ini terbuat dari besi tuang yang berputar dengan roda, kemudian bahan gesek (*disc pad*/kampas rem) adalah bagian yang berfungsi menjepit dan mencengkeram cakram, dan kaliper rem yang memiliki fungsi untuk menekan serta mendorong kampas rem agar bisa menjepit cakram. Pada dasarnya bentuk kontruksi dari rem cakram sama dengan rem tromol hanya pada rem cakram menggunakan piringan atau *disc* sebagai permukaan bidang gesek. Cara kerja rem cakram ini menggunakan sistem hidrolik, selanjutnya pengereman terjadi akibat dari gesekan antara kampas rem (*pad*) dengan cakram (*disc*) (Andun, 2005).

Keuntungannya : konstruksinya lebih sederhana, penggantian kampas rem mudah, tanpa penyetelan, karena berada diluar rem ini cepat melepas panas akibat dari gesekan yang ditimbulkan dari permukaan bidang gesek dengan kampas rem

Kekurangannya : Diperlukan tekanan pengereman yang lebih besar untuk mendapatkan daya pengereman yang efisien karena *self energizing effect* yang terjadi pada rem cakram sangat kecil, selain itu pad cenderung lebih cepat aus dibanding dengan sepatu rem pada rem tromol.



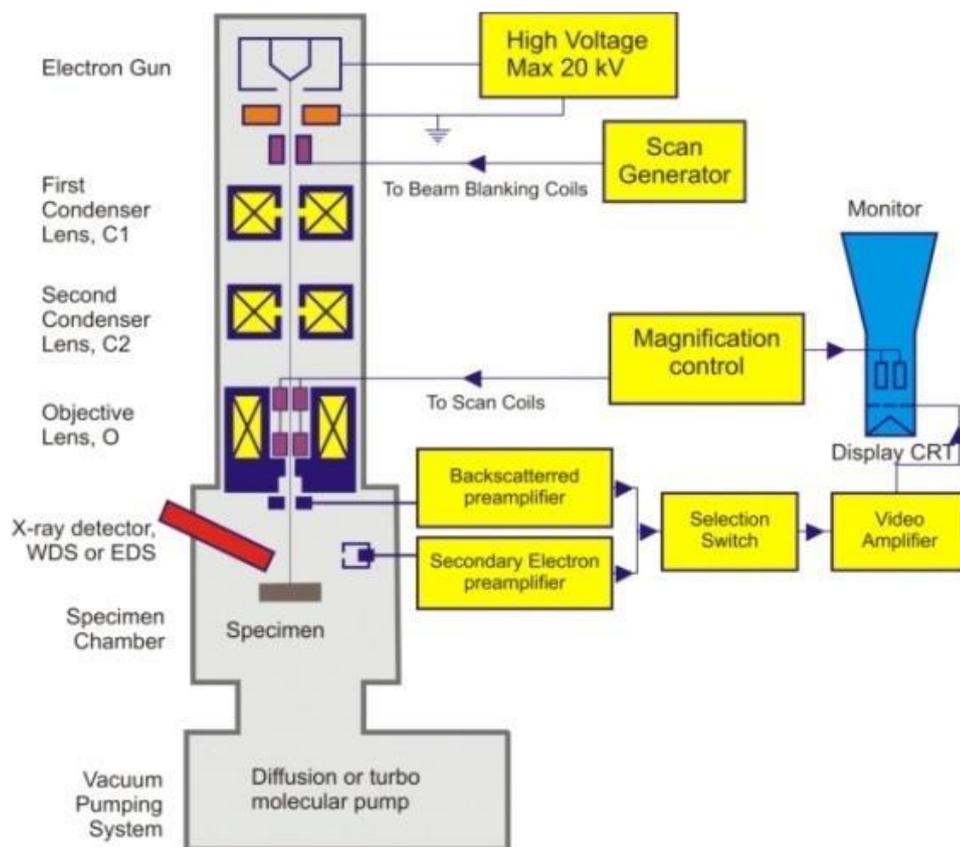
Gambar 2.17 Mekanisme rem cakram (<http://www.otokawan.com/2015/12/belajar-cara-kerja-rem-cakram-sepeda.html>, diakses tanggal 08 Januari 2018)

Prinsip kerja rem cakram adalah pada saat tuas rem ditekan maka minyak rem akan mendorong piston dengan menggunakan gaya hidrolis untuk menekan kampas rem supaya bergesekan dengan piringan cakram (*disc*) yang terhubung ke roda, sehingga laju kendaraan diperlambat (direm). Rem mengubah energi kinetik menjadi energi panas, serta membuat bahan friksi menjadi panas pula, hal tersebut membuat rem menjadi tidak efektif atau tidak pakem, oleh sebab itu perlu adanya pengembangan kembali tentang kampas rem atau bahan *friksi* agar rem menjadi lebih baik dan tahan terhadap suhu panas.

2.13 Pengujian SEM (*Scanning Electro Microscope*)

Pengujian SEM merupakan sebuah mikroskop elektron yang didesain untuk mengamati strukturmikro permukaan objek solid secara langsung. SEM mempunyai perbesaran 10 – 3.000.000 kali, dengan *depth of field* 4 – 0.4 mm serta resolusi sebesar 1 – 10 nm. Menurut Prasetyo, (2011) SEM banyak digunakan untuk keperluan penelitian dan industri karena perbesarannya yang tinggi, *depth of field* yang besar, resolusi yang baik, serta kemampuan untuk mengetahui informasi kristalografi dan komposisi suatu material. Dalam Gambar 2.18 merupakan skema diagram standar SEM, TESCAN VEGA 3 LMU. Adapun komponen utama dari alat SEM ini adalah dua pasang scan *coil discan-kan* dengan frekuensi variabel pada permukaan sampel material serta tiga pasang lensa elektromagnetik dengan fungsi memfokuskan berkas elektron menjadi sebuah titik kecil. Semakin besar resolusi

lateral yang dicapai maka semakin kecil berkas yang difokuskan. Akan tetapi SEM tidak memiliki sistem koreksi untuk kesalahan aberasi lainnya, kesalahan fisika yang ada pada lensa-lensa elektromagnetik berupa astigmatismus akan dikoreksi dengan perangkat stigmator. Kemudian yang kedua adalah sumber elektron, biasanya berupa filamen dari bahan kawat tungsten atau berupa jarum dari paduan Lantanum Hexaboride LaB₆ atau Cerium Hexaboride CeB₆, yang dapat menyediakan berkas elektron yang teoretis memiliki energi tunggal (monokromatik). Ketiga adalah *imaging detector*, dimana fungsinya adalah mengubah sinyal elektron menjadi sebuah gambar/image. Ada dua jenis detektor dalam SEM ini berdasarkan jenis elektronnya, yaitu detektor BSE dan detektor SE. (Sujatno dkk, 2015)



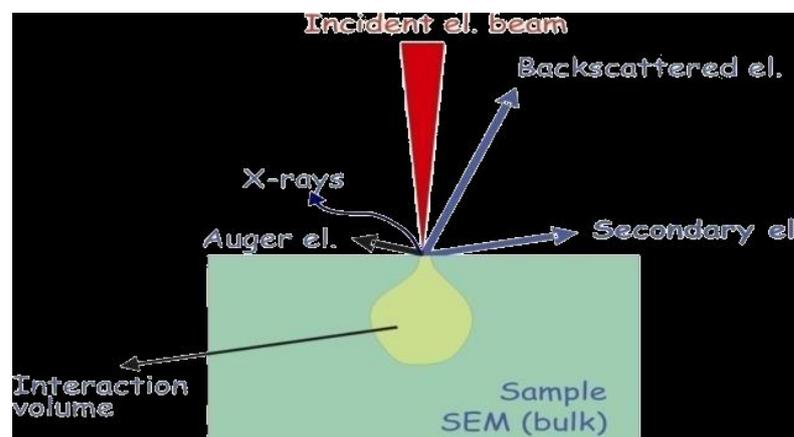
Gambar 2.18 Skematik diagram SEM (Sujatno dkk, 2015)

Seluruh jalur dari elektron (*column*) dibuat vakum hingga 10-60 torr guna menghindari gangguan dari molekul udara terhadap berkas elektron. Akan tetapi analisis pada bahan-bahan non-konduktif, seperti keramik dan oksida menjadi

sangat sulit karena naiknya sensitivitas pendeteksian alat akibat dari kevakuman yang tinggi. Solusinya SEM dapat dioperasikan dengan vakum rendah atau biasa disebut dengan *low-vacuum mode*. Dengan demikian kita dapat menganalisis bahan-bahan yang non konduktif. Pada mode ini tekanan berkisar antara 30 hingga 70Pa.

2.13.1 Interaksi bahan dan elektron

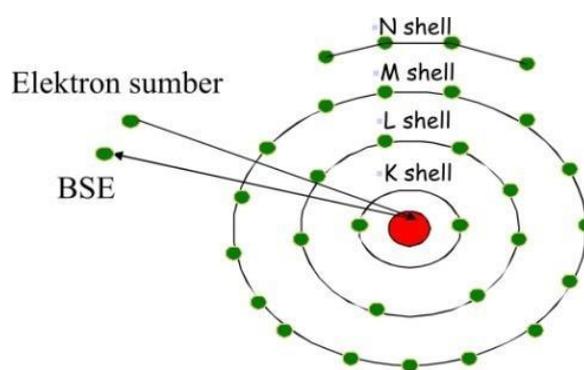
Interaksi elektron dengan atom-atom di permukaan maupun dibawah permukaan sampel terjadi ketika berkas-berkas elektron discan pada permukaan sample. Seperti terlihat pada Gambar 2.19, sebagian besar berkas elektron yang berhasil keluar kembali akibat interaksi dengan permukaan disebut dengan *Backscattered electrons* (BSE), dan sebagian kecil elektron masuk kedalam bahan material yang kemudian akan memindahkan sebagian besar energi pada elektron atom sehingga akan terpental ke permukaan luar bahan yaitu *Secondary Electrons* (SE). Munculnya X-ray yang karakteristik untuk setiap elemen, akan diikuti dengan pembentukan elektron-elektron sekunder, sehingga kandungan elemen yang ada di dalam bahan yang diteliti dapat diukur.



Gambar 2.19 Skema interaksi antara elektron dan bahan material di dalam SEM.
(Sujatno dkk, 2015)

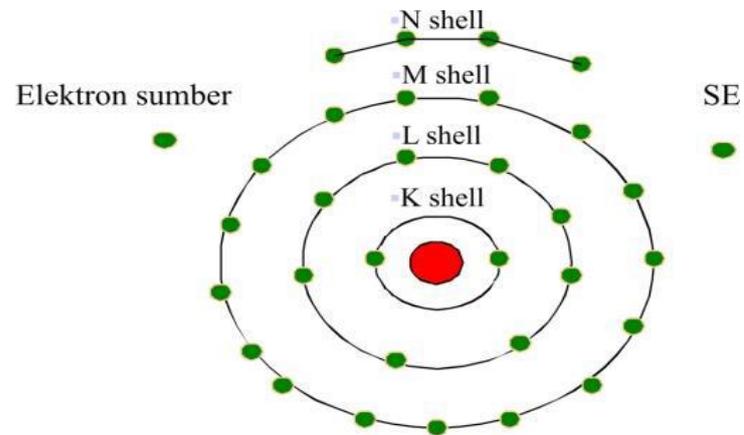
Pada bagian atom-atom permukaan sample yang lebih dalam adalah tempat proses pembentukan BSE, yang disebabkan oleh tumbukan antara elektron dari sumber dengan inti atom, seperti yang digambarkan pada Gambar 2.20. Setiap tumbukan akan menyebabkan terpentalnya sebagian besar elektron ke arah 180°

ini disebabkan karena massa proton yang membentuk inti hingga mencapai 2000 kali lebih besar daripada elektron. Dengan demikian, sebagian besar elektron akan dipantulkan kembali ke arah di mana mereka datang yaitu ke bagian luar permukaan bahan. Informasi tentang atom-atom yang ditumbuknya akan dibawa oleh elektron-elektron BSE ini beserta ikatannya dalam bentuk fasa. Kontras fasa dapat dipandang dengan batas-batas tertentu melalui *image* yang terbentuk dari elektron-elektron BSE.



Gambar 2.20 Skema proses terbentuknya BSE. (Sujatno dkk, 2015)

Elektron bisa saja memindahkan sebagian energi kinetiknya kepada satu atau lebih elektron ini terjadi jika elektron sumber dalam perjalanannya didalam bahan hanya melewati awan elektron atau orbital sebuah atom. Dalam kondisi tereksitasi elektron akan menjadi tidak stabil sehingga elektron akan keluar dari permukaan bahan dan meninggalkan posisinya, maka elektron tersebut dikenal juga dengan sebutan secondary electron (SE) atau elektron sekunder, dapat dilihat pada Gambar 2.21. Elektron-elektron yang dapat lolos ke luar hanya elektron yang berada sangat dekat dengan permukaan bahan saja ini terjadi karena energi yang dimiliki oleh elektron-elektron SE sangat rendah. Image morfologi permukaan bahan yang baik bisa didapatkan dengan memanfaatkan detector khusus elektron SE. Berikut ciri-ciri dari struktur permukaan, seperti, porositas, edge, batas butir, puncak atau lembah akan terlihat lebih detil dengan resolusi yang lebih tinggi dibandingkan dengan BSE. (Sujatno dkk, 2015)



Gambar 2.21 Skema proses pembentukan X-Rays dan SE. (Sujatno dkk, 2015)