

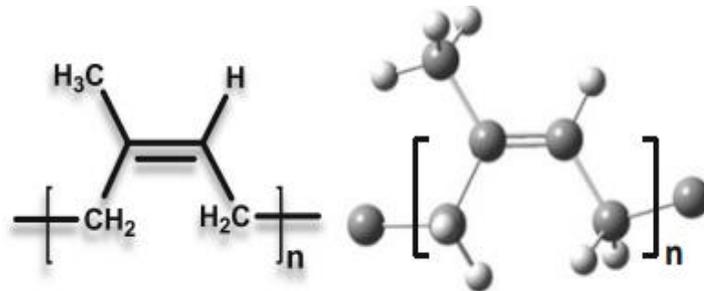
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karet Alam (*Ribbed Smoked Sheet*)

Karet merupakan salah satu komoditi perkebunan penting, baik sebagai sumber pendapatan, kesempatan kerja dan devisa, pendorong pertumbuhan ekonomi sentra-sentra baru di wilayah sekitar perkebunan karet maupun pelestarian lingkungan dan sumberdaya hayati (Litbang, 2007). Karet merupakan produk dari proses penggumpalan getah tanaman karet (lateks). Pohon karet normal disadap pada tahun ke-5. Produk dari penggumpalan lateks selanjutnya diolah untuk menghasilkan lembaran karet (*sheet*), bongkahan (kotak), atau karet remah (*crumb rubber*) yang merupakan bahan baku industri karet. Ekspor karet dari Indonesia dalam berbagai bentuk, yaitu dalam bentuk bahan baku industri (*sheet*, *crumb rubber*, SIR) dan produk turunannya seperti ban, komponen, dan lain sebagainya (Arif, 2009).

Hasil karet biasa dimanfaatkan atau diolah menjadi beberapa produk antara lain adalah : RSS I, RSS II, RSS III, *crumb rubber*, *lump*, dan lateks. Hasil utama dari pohon karet adalah lateks yang dapat dijual atau diperdagangkan di masyarakat berupa lateks segar, slab, ataupun sit asap/sit angin. Selanjutnya produk-produk tersebut akan digunakan sebagai bahan baku pabrik *crumb rubber*, yang menghasilkan berbagai bahan baku untuk berbagai industri hilir seperti ban, bola, sepatu, karet, sarung tangan, baju renang, karet gelang, mainan dari karet, dan berbagai produk hilir lainnya (Arif, 2009).



Gambar 1. Struktur 2D/3D Karet Alam
(Sumber: Singha dkk., 2019)

Karet alam ini memiliki struktur *cis-1,4-poly(isoprene)* dapat dilihat pada Gambar 1 yang mana pada dasarnya terkandung dalam getah susu atau lateks dari pohon *hevea brasiliensis*. Selain itu, terdapat kandungan produk non-karet berupa protein, karbohidrat, *lipid* dan garam anorganik yang sedikit. Produk non-karet ini dipisahkan dengan koagulasi asam, dicuci dengan air, lalu diproses menjadi lembaran (*sheets*). Peningkatan elastisitas karet dan kekuatan karet diperoleh dengan proses vulkanisasi umumnya dengan adanya *sulfur*, akselerator, dan bahan pengompon lainnya, menghasilkan jaringan tiga dimensi (Bokobza, 2018).

Ribbed Smoked Sheet (RSS) merupakan jenis karet konvensional yang termasuk dalam produk kedua terbesar yang sedang dikembangkan di Indonesia setelah karet remah atau SIR (*Standard Indonesian Rubber*). Produk RSS berupa lembaran (*sheet*) mendapat proses pengasapan yang baik. Pengolahan RSS ini menggunakan lateks kebun sebagai bahan baku. Lateks kebun diolah menjadi produk karet yang diinginkan dengan penambahan berbagai bahan kimia. Mutu karet RSS terdiri dari berbagai mutu mulai dari yang paling baik yaitu X RSS, RSS 1, RSS 2, RSS 3, dan cutting (Oktavia dkk, 2014). *Ribbed Smoked Sheet I* (RSS I) yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. *Ribbed Smoked Sheet I*

Karet alam dalam bentuk lembaran (*sheet*) adalah jenis tertua dan paling populer. *Sheet* ini juga merupakan bentuk paling sederhana dan termudah untuk dihasilkan dalam skala kecil, karet petani kecil di sebagian besar negara diproses dan dipasarkan sebagai karet lembaran. Kedua jenis *sheet rubbers* ini diproduksi untuk pasar komersial: *Ribbed Smoked Sheet* (RSS) dan *Air Dried Sheet* (ADS).

Dari keduanya, RSS adalah yang paling populer karena sifat mekaniknya dan kekuatan tariknya yang tinggi (Rodgers, 2016).

Karet RSS yang terbuat dari seluruh lateks kebun ini dikoagulasikan dengan sengaja dan diklasifikasikan dengan evaluasi visual. Untuk menetapkan nilai yang dapat diterima sebagai tujuan komersial, *The International Rubber Quality and Packing Conference* memberikan deskripsi untuk penilaian, dan *grade classification of ribbed smoked sheet rubber* dapat dilihat pada Tabel 1. Seluruh lateks kebun yang digunakan untuk menghasilkan RSS terlebih dahulu diencerkan menjadi 15% padatan dan kemudian digumpalkan sekitar 16 jam dengan asam format encer. Bahan terkoagulasi kemudian digiling, airnya dibuang, dan material tersebut dilapisi dengan permukaan kasar untuk memudahkan pengeringan. Lembaran tersebut kemudian digantung pada tiang untuk pengeringan di dalam rumah asap selama 2-4 hari (Rodgers, 2016).

Hanya lateks karet yang terkoagulasi dengan sengaja yang diolah menjadi lembaran karet, dikeringkan dengan benar, dan diasap yang dapat digunakan untuk membuat RSS. Sejumlah larangan juga berlaku bagi kualitas RSS. Karet basah, dikelantang, kurang terawat, dan karet asli serta karet yang tidak sepenuhnya kering secara visual pada saat inspeksi pembeli tidak dapat diterima (kecuali karet *undercured* yang ditentukan untuk RSS 5). Sedangkan, karet skim yang terbuat dari lateks skim tidak dapat digunakan secara keseluruhan atau sebagian menjadi *sheet* seperti yang dipersyaratkan dalam spesifikasi yang ditentukan (Rodgers, 2016).

Tabel 1. *Grade Classification of Ribbed Smoked Sheet Rubber*

<i>Category</i>	<i>Rubber Mold</i>	<i>Wrapping Mold</i>	<i>Opaque Spots</i>	<i>Oversmoked Spots</i>	<i>Oxidized Spots</i>	<i>Burnt Sheets</i>
RSS 1	<i>Very slight</i>	<i>Very slight</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>No</i>
RSS 2	<i>Slight</i>	<i>Slight</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>No</i>
RSS 3	<i>Slight</i>	<i>Slight</i>	<i>Slight</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>No</i>
RSS 4	<i>Slight</i>	<i>Slight</i>	<i>Slight</i>	<i>Slight</i>	<i>No</i>	<i>No</i>
RSS 5	<i>Slight</i>	<i>Slight</i>	<i>Slight</i>	<i>Slight</i>	<i>N/A</i>	<i>No</i>

(Sumber: Rodgers, 2016)

Sebelum menentukan kualitas RSS, lembaran-lembaran itu dipisahkan dan diperiksa, dan semua cacat dihilangkan dengan memotong manual dan membuang

material yang rusak (Rodgers, 2016). Tabel 1 memberikan ringkasan kriteria menurut para *inspector* dalam menilai RSS. Semakin gelap karet, semakin rendah kualitas (*grade*). kualitas premium adalah RSS I, dan kualitas lebih rendah biasanya RSS 4. *Air Dried Sheet* (ADS) disiapkan dalam kondisi yang sangat mirip dengan lembaran asap tetapi dikeringkan dalam ruang tanpa asap atau aditif, kecuali natrium bisulfat. Oleh karena itu, karet ADS tidak memiliki perlindungan antioksidan seperti yang diberikan dalam pengeringan karet di rumah asap. Bahan ini dapat diganti dengan kualitas RSS 1 atau RSS 2 di berbagai aplikasi (Rodgers, 2016).

2.2 Hibrid

Kata “*Hybrid*” berasal dari bahasa latin yunani, berarti sesuatu yang telah dicampurkan dengan material atau komposisi lainnya. Saat ini, istilah ini digunakan dalam beberapa bidang ilmiah, umumnya ilmu material dan teknik. Umumnya, istilah “*hybrid*” memberikan berbagai pengertian tergantung pada bidang penelitian. Material hibrid didefinisikan sebagai kombinasi sengaja antara dua atau lebih material yang melengkapi satu sama lain agar memiliki banyak fungsi atau fungsi baru yang tidak dimiliki material aslinya (Salim dkk., 2017).

Penggunaan kata “*hybrid*” paling awal dimulai pada tahun 1980-an, yaitu ketika teknik kimia lunak dapat menghasilkan material anorganik pada temperatur rendah berkembang. Pada awal era industri, material hibrid ini terus menerus diproduksi. Contohnya pigmen anorganik yang dihilangkan dalam solvent untuk cat, dan tanah liat mineral yang dicampur dengan polimer. Sejak itu, konsep hibrid telah masuk dalam banyak bidang berhubungan dengan kimia, fisika, biomedis, ilmu material dan teknik teknik. Sejak waktu itulah, konsep ini pertama kali diperkenalkan, perkembangan dari material baru atau material yang berubah dengan peningkatan berbagai sifat menjadi tujuan yang memotivasi bagi banyak peneliti. Elemen atau kompon hibrid ini harus memperoleh sifat aslinya, sambil secara serentak mempertahankan aspek yang bermanfaat. Karakteristik ini telah menyebabkan popularitas yang berkembang dari material hibrid (Salim dkk., 2017).

Dalam sistem polimer, komposit hibrid dapat dijelaskan baik sebagai; (i) komponen dimana satu jenis material yang memperkuat diletakkan dalam campuran atau matriks yang berbeda ataupun (ii) dua atau lebih *filler* baik *reinforcing* maupun *non-reinforcing* bercampur dalam matriks tunggal. Kedua pendekatan ini juga dapat digabungkan. Kombinasi dua atau lebih material untuk membentuk hibrid dapat terjadi pada skala nanometer atau tingkat molekuler ketika interaksi orbital terjadi. Hal ini akan menciptakan material baru yang memiliki sifat-sifat baru yang belum tentu ditemukan dalam komponen individu. Material hibrid harus memiliki fungsi dan sifat yang lebih baik dibanding komposit biasa. Akan tetapi, material nanokomposit dapat dianggap sebagai material hibrid ketika nanopartikel secara homogen terdispersi dalam matriks karet (Salim dkk., 2017).

Dalam kasus polimer dengan bahan pengisi hibrid, istilah “sinergi” memberikan peran penting dalam menjelaskan interaksi antara komponen, dan memiliki kombinasi yang memberikan efek unggul daripada jumlah efek komponen individu. Dalam kata lain, sinergi adalah aksi bersama perantara (*agent*) yang dapat meningkatkan keefektifan satu sama lain ketika dikombinasikan. Banyak peneliti dalam bidang ini mengindikasikan efek sinergis positif dan meningkatkan sifat matriks yang diperkuat dengan bahan pengisi hibrid secara keseluruhan (Salim dkk., 2017).

2.3 Bahan Pengisi (*Filler*)

Filler (bahan pengisi) sering ditambahkan pada polimer untuk meningkatkan kekuatan regang dan tegangan pampat, ketahanan abrasi, kekerasan, kestabilan dimensi dan termal, dan sifat lainnya. Bahan yang digunakan sebagai pengisi biasanya partikel yang mengandung bubuk kayu (serpihan bubuk kayu halus), bubuk silika, pasir, kaca, tanah liat, batu kapur, dan bahkan beberapa polimer sintesis lainnya. Ukuran partikel mulai dari 10 nm sampai dimensi makroskopik. Karena bahan-bahan yang tidak mahal ini menggantikan beberapa volume dari polimer yang lebih mahal sehingga harga produk akhirnya dapat dikurangi (Callister dkk., 2002).

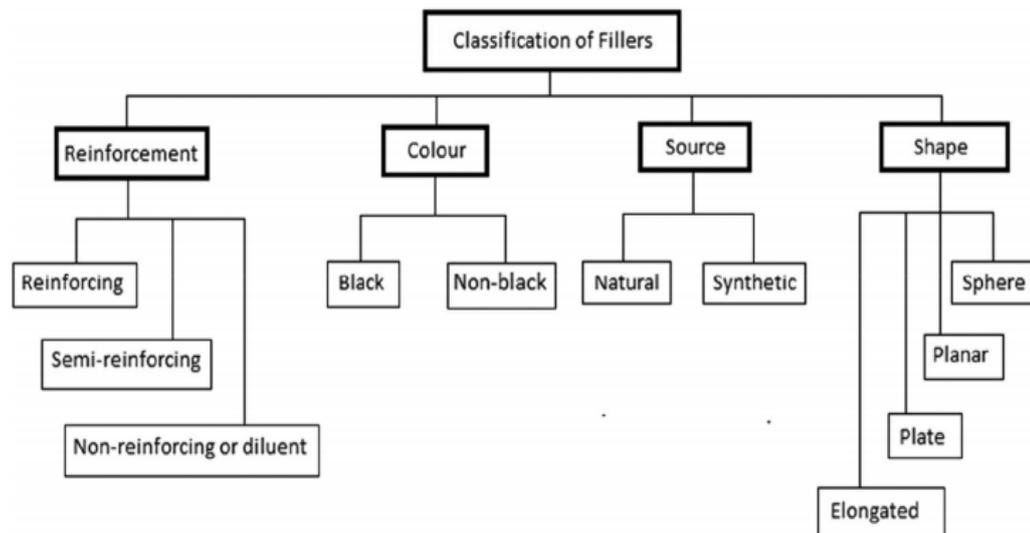
Penguatan bahan pengisi dalam vulkanisat karet adalah masalah yang sangat luas dan kompleks di antara peneliti dan teknologi karet. Karet yang tidak memiliki bahan pengisi (*unfilled rubber*), juga dikenal sebagai vulkanisat *gum*, adalah vulkanisat karet yang berisi bahan yang diperlukan untuk vulkanisasi atau proses *curing*. Penggunaan bahan pengisi sebagai bahan pengompon dalam campuran karet adalah tiga kali lipat. Pertama, *filler* ditambahkan pada campuran untuk menurunkan harga dari produk akhir. Bahan pengisi yang biasa digunakan dalam industri karet biasanya lebih murah daripada polimer dimana polimer tersebut digunakan. Kedua, bahan pengisi ditambahkan pada karet selama pencampuran untuk memodifikasi kinerja proses. Bahan pengisi secara signifikan dapat mempengaruhi sebagian besar perilaku pengolahan karet. Ternyata kompon karet campuran *gum* menunjukkan karakteristik proses yang lemah, seperti *calendar shrinkage* dan *extrudate swell* yang tinggi (Salim dkk., 2017).

Produk karet selalu diisi dengan sejumlah bahan pengisi baik yang memperkuat (*reinforcing*) maupun tidak memperkuat (*non-reinforcing*), meliputi *carbon black*, *precipitated silica*, tanah liat, *calcium carbonate* dan lain sebagainya. Fungsi bahan pengisi yang memperkuat (*reinforcing*) adalah untuk meningkatkan sifat karet, seperti kuat tarik, *abradability*, kuat sobek, modulus, stabilitas termal, *barrier*, vulkanisasi, sifat-sifat proses dan seterusnya dan untuk meningkatkan *service performance* dan memperlama masa gunanya. Sebaliknya, bahan pengisi yang *non-reinforcing* hanya berfungsi untuk meningkatkan massa dan mengurangi biaya karet (Liu dkk., 2007). Klasifikasi bahan pengisi karet seperti yang terlihat pada Gambar 3 sangat bervariasi berdasarkan sifat produknya. Bahan pengisi dapat dikelompokkan menjadi *reinforcing*, *semi-reinforcing* dan *non-reinforcing*. Semua bahan pengisi dapat meningkatkan kekerasan, modulus, kekakuan vulkanisat karet baik *reinforcing* maupun *non-reinforcing*.

Karakteristik utama bahan pengisi yang akan mempengaruhi sifat vulkanisat karet adalah ukuran partikel, luas permukaan partikel, bentuk partikel dan aktivitas partikel. Efek penguat dari bahan pengisi dalam kompon karet akan

meningkat jika bahan pengisi memiliki ukuran partikel yang kecil. Ukuran partikel bahan pengisi dapat dikategorikan sebagai berikut (Salim dkk., 2017) :

- Lebih dari 10.000 nm ($10 \mu\text{m}$) : *Degradants*
- 10.000-10.000 nm ($1-10 \mu\text{m}$) : *Diluents*
- 100-1000 nm ($0,1-1 \mu\text{m}$) : *Semireinforcing*
- 10-100 nm ($0,01-0,1 \mu\text{m}$) : *Reinforcing*



Gambar 3. Klasifikasi Bahan Pengisi Karet
(Sumber: Salim dkk., 2017)

Menurut Abednego (1998), Penguatan bahan pengisi ditentukan oleh ukuran, keadaan permukaan dan kehalusan butir. Penambahan optimum bahan pengisi akan meningkatkan kekuatan tarik, modulus, ketahanan sobek, ketahanan kikis dan retak lentur. Untuk memperoleh penguatan optimum maka butir-butir bahan pengisi harus tersebar dengan baik dan merata dalam kompon dan peningkatan jumlah *Filler* mempengaruhi perbaikan sifat vulkanisat.

Penggunaan bahan pengisi pada kompon karet tidak hanya berfungsi sebagai suatu faktor penentu pada sifat fisik vulkanisat karet tetapi juga dengan alasan pertimbangan ekonomi pada produk barang jadi karet. Bahan pengisi dapat menurunkan harga produk barang jadi karet tanpa mengurangi mutu dari produknya. Karet dan bahan pengisi ini masing-masing mempunyai penguatan tersendiri terhadap sifat fisik pada vulkanisat karet, namun dari kedua bahan ini, sinergi penguatan sifat fisik pada vulkanisat karet dapat dihasilkan. Penguatan

sifat fisik ini dapat disebabkan oleh semakin banyak volume bahan pengisi dan dapat juga disebabkan oleh penggunaan bahan pengisi dengan struktur tinggi (*high structure*) di dalam karet (Hasan, 2013).

Struktur bahan pengisi yang didasarkan pada ketidakteraturan pada permukaannya menyebabkan pada peningkatan luas permukaan bahan pengisi tersebut. Semakin tinggi struktur bahan pengisi, semakin besar luas permukaannya untuk setiap satuan masa bahan pengisi. Begitu juga dengan peningkatan jumlah bahan pengisi, ini juga berarti dapat meningkatkan luas permukaan untuk setiap satuan masa bahan pengisi. Luas permukaan yang besar dapat menyebabkan adsorpsi molekul karet di permukaannya menjadi semakin banyak, sehingga *bound rubber* menjadi lebih banyak yang terbentuk (Hasan, 2013).

Bound rubber merupakan *level of reinforcement* pada vulkanisat karet, sehingga semakin banyak pembentukan *bound rubber* di dalam karet, menyebabkan penguatan pada karet mengalami kenaikan. Sebagai contoh, ketahanan kikis dan kekerasan mengalami peningkatan dengan kenaikan pembentukan *bound rubber*. Dengan fakta demikian, *bound rubber* dapat mempengaruhi sifat fisik pada vulkanisat karet (Hasan, 2013).

Penambahan bahan material anorganik ke dalam polimer organik adalah salah satu cara untuk meningkatkan sifat fisik dan mekanik polimer termasuk kekerasan, kuat tarik, dan elongasi. Karet adalah polimer elastomer dengan sifat-sifat luar biasa, seperti isolasi elektrik tinggi karena kekuatannya rendah, ketahanan korosi, ketahanan sobek tinggi, dan elongasi yang tinggi. Akan tetapi, karet murni itu sendiri sulit untuk menghadapi persyaratan aplikasi industri karena kekuatan dan sifat termalnya rendah. Oleh karena itu, dalam banyak aplikasi industri, karet yang dicampur dengan bahan pengisi anorganik tidak hanya meningkatkan sifat kinerjanya tetapi juga untuk meningkatkan *durability* dari kompon karet dan harga produk akhir. Pada saat ini bahan pengisi umumnya meliputi *carbon black*, *silica* (SiO_2), *calcium carbonate* (CaCO_3), *talca*, dan juga bahan pengisi mineral lainnya berbasis mineral *clay* (tanah liat) seperti kaolin (Khongwong dkk., 2019).

Bahan pengisi yang digunakan pada penelitian ini ada 2 macam, yaitu:

1. Tanah Liat

Mineral tanah liat tersedia berlimpah di alam. Tanah liat telah digunakan dengan cukup luas dalam berbagai aplikasi pertanian dan industri, sebagian besar sebagai bahan pengisi (*filler*) yang lebih murah. Beberapa puluh tahun yang lalu, para peneliti menemukan bahwa sejumlah kecil tanah liat yang ditambahkan sebagai *filler* dapat memberikan manfaat tambahan pada matriks polimer (Salim dkk., 2017).

Industri karet umumnya menggunakan berbagai macam bahan pengisi. *Carbon black* telah menjadi bahan pengisi terpenting untuk komposit karet dalam hal penguatan (*reinforcement*). Akan tetapi, ketergantungan pada *carbon black* dengan produk minyak bumi, sifatnya yang mencemari, dan menentukan restriksi warna telah mendorong pengusaha pabrik untuk menggunakan bahan pengisi *non-black* (Pajarito, 2019).

Para peneliti menyatakan bahwa cukup sulit bagi kebanyakan bahan pengisi anorganik umum untuk meningkatkan massa sekaligus mengurangi biaya dan memberikan penguatan secara serentak. *Carbon black* and *precipitated silica* dengan struktur halus berskala nano biasanya digunakan untuk memperkuat komposit karet (Liu dkk., 2007). Akan tetapi harganya lebih tinggi dari bahan pengisi lainnya.

Tanah liat memiliki harga yang rendah dan banyak sifat struktural yang menarik seperti gugus *hydroxyl*, asam lewis, *exchangeable cations* antar lapisan yang dapat bertukar, perbedaan gabungan Si-O *tetrahedral* dan gabungan Al-OH *octahedral*. Terlebih lagi, kandungan mineral tanah liat merupakan bahan berbutir halus dengan luas permukaan yang tinggi dan penyerapan yang kuat (Liu dkk., 2007). Hal ini membuat tanah liat menjadi cukup menjanjikan pada aplikasi saat ini. Partikel halus tanah liat sebagai bahan pengisi murah telah banyak digunakan dalam komposit polimer meliputi karet, plastik, lapisan, cat, dan lain sebagainya serta berhasil dalam mengurangi konsumsi polimer dan biaya komposit.

Nanoclays, dalam beberapa tahun terakhir, telah memikat banyak perhatian karena kemampuannya dalam meningkatkan sifat mekanik vulkanisat

karet. peningkatan sifat-sifat ini bisa dicapai pada kandungan tanah liat yang sangat rendah (kurang dari 10 phr). Kombinasi jumlah tanah liat yang sedikit menghasilkan material yang lebih kaku, yang dicerminkan pada peningkatan kekerasan (*hardness*) dan *modulus* yang jelas (Rattanasom dan Prasertsri, 2008). Tanah liat digunakan sebagai alternatif bahan pengisi karena mengandung unsur kimia *silica* yang dapat menambah kekuatan ikatan yang terjadi pada komponen vulkanisat karet. *Clay* dikenali sebagai tanah liat, merupakan jenis mineral halus, berbentuk kepingan dan komposisi makro dari *Clay* SiO₂ 50,03% (Sebayang dkk., 2010).

Jenis tanah liat yang digunakan pada penelitian ini adalah tanah liat pada lapisan *interburden* B₂-C dengan kandungan SiO₂ sebesar 56,87%. Kandungan mineral pada lapisan tanah liat di area PT Bukit Asam ini dapat dilihat pada Tabel 2 berdasarkan hasil penelitian (Hasan dkk., 2018). Tanah liat ini diperoleh dari area penambangan di PT Bukit Asam Tbk. Menurut Prasetia (2016), Ada beberapa lokasi penambangan di PT Bukit Asam yaitu Tambang Air Laya, Tambang Muara Tiga Besar, dan Tambang Banko Barat. Litologi batuan yang terdapat di daerah banko barat pada area penambangan PT Bukit Asam Tbk ini antara lain:

a. Lapisan Tanah Penutup

Terdiri dari tanah buangan lama, batu lempung bentonitan, batu pasir, gravel, dan endapan lempur. Selain itu dijumpai juga *clay ironstone*.

b. Lapisan Batubara A₁

Lapisan ini memiliki ketebalan sekitar 7,3 meter yang dicirikan oleh adanya lapisan pengotor sebanyak 2-3 lapis dan di bagian *base* dijumpai lensa-lensa batu lanau.

c. Lapisan *Interburden* A₁-A₂

Lapisan ini terdiri dari batu lempung atau batu pasir tufaan dengan ketebalan sekitar 4 meter.

d. Lapisan Batubara A₂

Lapisan ini dicirikan oleh adanya lapisan silika pada bagian atas dan pita pengotor karbonan serta lensa-lensa batu lanau. Ketebalan lapisan ini sekitar 9,8 meter.

e. Lapisan *Interburden* A₂-B₁

Lapisan ini merupakan perulangan batu pasir dan batu lanau dengan sisipan tipis batubara/batu lempung karbonan disebut juga dengan *Suban Marker*. Ketebalan lapisan ini sekitar 18 meter.

f. Lapisan *Interburden* B₁

Biasanya terdapat lapisan pengotor sebanyak 2-3 lapis yang berupa batu lempung, lanauan karbonan. Ketebalan lapisan ini sekitar 12,7 meter.

g. Lapisan *Interburden* B₁-B₂

Lapisan ini merupakan selang-seling batu lempung dan batu lanau. Ketebalan lapisan ini sekitar 3 meter.

h. Lapisan Batubara B₂

Pada lapisan ini dijumpai adanya pita pengotor berupa batu lempung lanauan karbonan yang berbentuk seperti lensa. Ketebalan lapisan ini sekitar 4,5 meter.

i. Lapisan *Interburden* B₂-C

Lapisan ini merupakan perulangan batu pasir dan batu lanau dengan ketebalan sekitar 38 meter.

j. Lapisan batubara C₁

Pada lapisan ini dijumpai adanya 1-2 lapis pita pengotor berupa batu lempung, batu lanau karbonan. Ketebalan lapisan ini sekitar 5,1 meter.

k. Lapisan *Interburden* C₁-C₂

Lapisan terdiri dari selang-seling batu lempung dan batu lanau. Ketebalan lapisan ini sekitar 3,5 meter.

l. Lapisan Batubara C₂

Pada lapisan ini dijumpai adanya 1-2 lapis pita pengotor berupa batu lempung, batu lanau karbonan. Ketebalan lapisan ini sekitar 6,2 meter.

2. ***Carbon Black***

Dalam banyak aplikasi, karet alam dicampurkan dengan bahan pengisi, untuk meningkatkan reaksi mekanik, konduktivitas elektrik dan termal, serta sifat penghalang (*barriers*). Pentingnya bahan pengisi *carbon black* dalam industri karet telah dikenal selama bertahun-tahun, *reinforcing carbon black* terdiri dari partikel bahan pengisi primer yang menyatu bersama untuk membangun agregat stabil agar tetap membentuk *agglomerate* (gumpalan) yang dapat dirusak dengan pencampuran mekanik. Proses sederhana yang membantu efek penguatan bahan pengisi karet telah secara luas dibahas dalam banyak penelitian. Terutama mengenai peningkatan kekakuan dikaitkan dengan bahan pengisi kaku, peningkatan densitas *crosslinking* dengan interaksi *polymer-filler*, interaksi *filler-filler* yang menyebabkan konsentrasi *filler* tinggi, dan pembentukan jaringan *filler* yang dilakukan oleh gaya *van der waals* lemah (Bokobza, 2018).

Carbon black dihasilkan dengan kondisi proses pembakaran yang tidak sempurna dari fraksi berat seperti *catalytic fluid*, *cracking tar*, *coal tar*, *crack ethylene tar*, dan sedikit berasal dari minyak sayur. *Carbon black* kebanyakan digunakan sebagai *filler* pada kompon karet karena sifatnya sebagai penguat dapat memperbaiki sifat fisik kompon karet tersebut. *Carbon black* memiliki unsur karbon murni lebih banyak dibanding karbon jenis lainnya (Hasan dkk., 2018).

Carbon black (CB) tidak hanya yang paling banyak digunakan tetapi juga pengisi terlama dalam bahan karet yang digunakan untuk meningkatkan sifat tarik, ketahanan sobek dan abrasi, kekerasan, dll. Dalam beberapa tahun terakhir, nanokomposit polimer dibuat dengan menggabungkan nanopartikel anisotropik kaku (seperti *nanoclay* (NC) dan karbon *nanotube*) telah menarik minat karena dispersi skala nanometernya dalam matriks polimer dan luas permukaan spesifik yang tinggi (Qu dkk., 2009).

Carbon black merupakan partikel mengandung karbon yang membentuk agregat atau aglomerat. Sebagian partikelnya mempunyai struktur grafit dan ada yang membentuk koloid. Bagian luar partikel carbon black lebih banyak mempunyai struktur grafit dibandingkan dengan bagian pusatnya. Ukuran partikelnya mempunyai diameter berkisar 10 nm-400 nm yang dapat ditentukan dengan mengukur luas permukaannya menggunakan metoda adsorpsi.

Pengukuran dilakukan dengan mengangap bahwa setiap partikel *carbon black* berbentuk bulat. Metode BET (*Brunauer, Emmett, Teller*) biasa digunakan untuk menentukan ukuran partikel rata-rata (ASTM D 1510-1991). Metode lain yang juga biasa digunakan untuk menentukan luas permukaan carbon black adalah metode adsorpsi nitrogen (ASTM D 3037-1991) (Hasan, 2013). Berikut ini disajikan ukuran partikel dan luas permukaan carbon black dengan beberapa tipe dan strukturnya.

Tabel 2. Nomenklatur *Carbon Black*

Tipe dan struktur <i>carbon black</i>	Luas permukaan m ² /g	Ukuran partikel rata-rata, nm
N 110	140	20-25
N 234	120	24-29
N 220	120	24-33
N 375	90	30-35
N 330	80	28-36
N 550	45	39-55
N 660	37	50-60
N 774	28	70-96
N 880	14	180-200
N 990	6	250-350

(sumber: Hasan, 2013)

Bahan karet yang hanya diperkuat oleh satu jenis pengisi tidak dapat memenuhi aplikasi industri yang semakin rumit ini dimana biasanya menuntut bahan secara serentak memiliki berbagai sifat luar biasa, sehingga kombinasi *nanofiller* dan pengisi CB konvensional telah membuka prospek baru dalam mengembangkan bahan karet baru dengan sifat yang lebih baik (Qu dkk., 2009). Jenis *carbon black* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. *Carbon Black N330*

Silica dan *carbon black* merupakan bahan pengisi *reinforcing* yang digunakan untuk meningkatkan sifat mekanik berbagai macam karet. Pada umumnya, karet yang diperkuat dengan *carbon black* menunjukkan *modulus* yang lebih tinggi daripada karet yang diperkuat dengan *silica*. Akan tetapi, *silica* memberikan gabungan dari sifat kuat *sobek*, *aging resistance*, dan sifat adhesi yang unik (Rattanasom dan Prasetsri, 2008).

2.4 Vulkanisat Karet

Menurut Handoko (2003), kompon karet adalah campuran antara karet dengan berbagai bahan kimia untuk memperoleh hasil akhir atau vulkanisat setelah melalui proses tertentu. Abednego (1990), menyatakan penambahan kompon karet meliputi pemilihan jenis dan jumlah bahan kimia karet serta pencampuran karet mentah dan jenis bahan kimia tertentu sehingga dihasilkan barang jadi karet dengan sifat-sifat fisik yang diinginkan.

Pengomponan (*compounding*), hal yang telah berkembang dalam industri ban dan karet, adalah ilmu material yang mengubah karet atau elastomer atau campuran polimer, dan bahan lainnya dalam mengoptimalkan sifat-sifat untuk memenuhi parameter hasil. Pengomponan adalah ilmu multidisiplin kompleks yang memerlukan ilmu fisik material, kimia polimer dan organik, kimia anorganik, reaksi kinetik kimia. Para peneliti material,

ketika merancang formulasi karet, memiliki berbagai tujuan dan restriksi di dalamnya ketika melakukan. Syarat hasil produk akan mengatakan pemilihan awal bahan formula. Material ini harus aman bagi lingkungan, memenuhi kesehatan kerja dan persyaratan keamanan, dapat diproses pada tempat pembuatan produk, dan hemat biaya (Rodgers dan Waddell, 2005).

Kompon karet ini memiliki karakteristik unik yang tidak dapat ditemukan pada material lainnya, seperti *dampening properties*, *high elasticity*, dan *abrasion resistance*. Karena karet telah digunakan dalam aplikasi seperti ban, *conveyor belts*, *dock fender* besar, pondasi bangunan, komponen mesin otomotif, dan berbagai terapan domestik lainnya (Rodgers dan Waddell, 2005). Gambar kompon karet dapat dilihat pada Gambar 5.

Bahan-bahan yang tersedia pada ilmu material untuk formulasi kompon karet bisa dibagi menjadi 5 kategori :

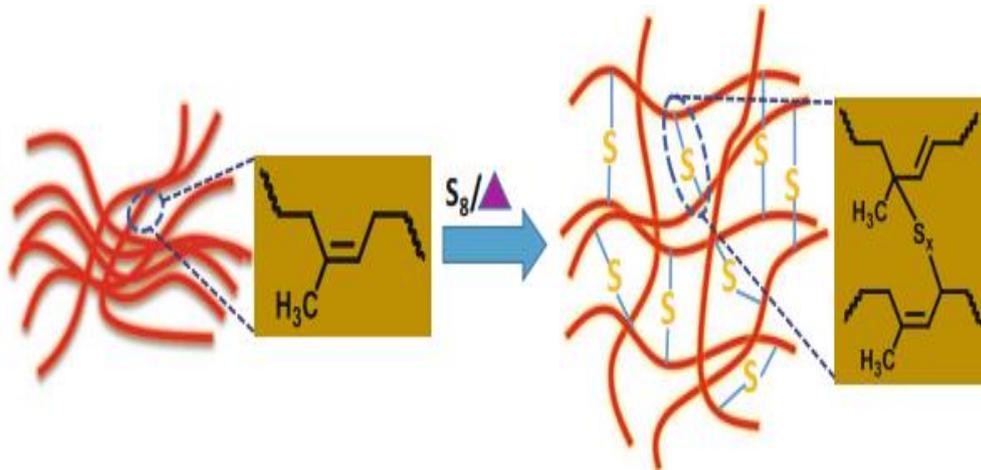
- | | |
|------------------------------|--|
| 1. <i>Polymers</i> | Karet alam, polimer sintetik |
| 2. <i>Filler system</i> | <i>Carbon black, clays, silicas, calcium carbonate</i> |
| 3. <i>Stabilizer system</i> | <i>Antioxidants, Antiozonants, waxes</i> |
| 4. <i>Vulcanizing system</i> | <i>Sulfur, Accelerators, activators</i> |
| <i>Component</i> | |
| 5. <i>Special materials</i> | komponen sekunder seperti <i>pigments, oils, resins, processing aids, dan short fibers</i> |



Gambar 5. Kompon Karet

2.4.1 Proses Vulkanisasi

Secara teoritis, vulkanisasi adalah proses kimia dimana rantai panjang dari molekul karet tertaut silang (*crosslinked*), menyebabkan perubahan dari material yang semula halus/lembut, lemah seperti plastik menjadi produk elastis yang kuat dengan *reversible deformability* bersama sifat mekaniknya yang baik karena kristalisasi *strain-induced* (tegang paksa), histerisis rendah, sifat dinamis yang luar biasa dan ketahanan *fatigue*. Selama vulkanisasi, karet dipanaskan dengan *sulfur* atau bahan *curatives* lainnya dengan atau tanpa akselerator. Seperti halnya bahan aditif memperkuat rantai polimer dengan menghasilkan *crosslinks* di antara rantai polimer individual untuk memperoleh peningkatan elastisitas, kepegasan, dan peningkatan sifat mekanik (Singha dkk., 2019). Proses vulkanisasi pada karet alam dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Vulkanisasi Karet Alam

(Sumber: Singha dkk., 2019)

Prinsip-prinsip perubahan akibat reaksi vulkanisasi antara lain:

1. Kompon karet dikonversi dari bahan yang bersifat plastis atau pseudoplastis dengan kekuatan yang sangat rendah menjadi bahan yang elastis dengan kekuatan dan kepegasan (*resilience*) yang lebih baik,
2. Terjadi perubahan sifat-sifat fisik karet seperti kuat tarik,

3. Sifat-sifat fisik vulkanisat lebih tahan pada kisaran suhu tertentu bila dibandingkan dengan sebelum divulkanisasi, dan
4. Polimer-polimer yang berikatan silang (*crosslinked polymer*) mengembang di dalam larutan yang biasanya dapat melarutkan polimer-polimer yang tidak berikatan silang, tahan terhadap kerusakan oleh panas, sinar, dan proses penuaan serta kehilangan *tackiness*-nya.

Ikatan silang secara kimia (*chemical crosslink*) di antara molekul yang terjadi pada proses vulkanisasi atau pada proses pabrikasi (*fabricating articles*), menghasilkan ikatan polimer-polimer dengan struktur jaringan tiga dimensi. Reaksi yang terjadi selama fabrikasi disebut dengan reaksi vulkanisasi di industri karet dan *curing* atau *hardening* pada industri plastik. Ikatan silang yang terjadi pada vulkanisat karet merupakan akibat dari reaksi karet dengan bahan pemvulkanis (Hasan, 2013).

2.4.2 Reaksi Vulkanisat Karet dan Belerang

Pada mekanisme reaksi vulkanisasi antara molekul karet dan belerang, bahan pencepat dan bahan penggiat bereaksi membentuk kompleks bahan pencepat aktif (*active accelerator complex*), kemudian bereaksi membentuk bahan aktif yang mengandung belerang dan berikatan sementara dengan karet (*rubber bound intermediate*). Setelah itu, membentuk jaringan ikatan polisulfida dan diikuti oleh proses maturasi jaringan (*network maturation process*). Langkah terakhir, pemendekan ikatan silang dengan ikatan silang tambahan, perusakan ikatan silang dengan modifikasi rantai utama membentuk sulfida siklik, ikatan belerang-belerang yang menggelayung (*pendent sulfidic group*) (Hasan, 2013).

2.5 Bahan Kimia Karet

Kompon karet pada umumnya mengandung tiga atau lebih jenis bahan kimia karet. Setiap jenis bahan tersebut memiliki fungsi spesifik dan mempunyai pengaruh terhadap sifat, karakteristik pengolahan, dan harga dari komponnya. Bahan kimia yang digunakan pada proses pembuatan kompon karet cukup banyak di antaranya adalah:

2.5.1 *Sulfur*

Sulfur merupakan bahan kimia pertama yang digunakan sebagai bahan pemvulkanisasi (Alfa, 2003). Bahan pemvulkanisasi *sulfur* yang digunakan ini dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. *Sulfur*

Bahan pemvulkanisasi adalah sejenis bahan kimia karet yang dapat bereaksi dengan gugus aktif molekul karet pada proses vulkanisasi, membentuk ikatan silang antar molekul karet, sehingga terbentuk jaringan tiga dimensi (Alfa, 2003).

2.5.2 *Tetramethyl Thiuram Disulfide (TMTD)*

TMTD merupakan bahan akselerator yang digunakan untuk mengurangi waktu reaksi vulkanisasi (*curing time*) dengan cara meningkatkan laju vulkanisasi (*rate of vulcanization*) dan digunakan secara kombinasi dengan bahan pemvulkanis. Dalam kasus-kasus tertentu, terjadi peningkatan sifat-sifat fisik (Hasan, 2013). Bahan akselerator TMTD yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. TMTD

2.5.3 *Zinc Oxide* dan *Stearic Acid*

Bahan *activator* adalah bahan kimia yang ditambahkan ke dalam sistem vulkanisasi untuk menggiatkan proses vulkanisasi. Dalam sistem vulkanisasi dengan bahan akselerator, bahan ini berfungsi sebagai pengaktif kerja bahan akselerator karena pada umumnya bahan akselerator organik tidak dapat berfungsi secara efisien tanpa adanya bahan *activator*. Bahan pengaktif terbagi menjadi dua golongan, yaitu anorganik berupa oksida logam (ZnO, PbO, dan Mg) dan organik berupa asam lemak rantai panjang (stearat dan oleat). Bahan pengaktif yang paling umum digunakan adalah *zinc Oxide* (ZnO) dan *stearic Acid* (Alfa, 2003).

Bahan *activator* yang digunakan dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 9. ZnO dan *Stearic Acid*

2.5.4 *Tri Methyl Quinon (TMQ)*

TMQ merupakan bahan anti oksidan. Menurut Rodgers (2004), Penambahan anti oksidan pada kompon karet akan menghambat kerusakan karet karena udara (O₂), sinar matahari, dan ozon. Karet tanpa anti oksidan akan mudah teroksidasi sehingga menjadi lunak kemudian lengket dan akhirnya menjadi keras dan retak-retak (*aging*). Bahan antioksidan TMQ dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. TMQ

2.5.5 *Paraffinic Oil*

Paraffinic oil merupakan bahan *softener*. Bahan *softener* berfungsi untuk melunakkan karet mentah agar mudah diolah menjadi kompon karet dan mempermudah karet lepas dari cetakan (Hasan dkk, 2018). Menurut (Hasan, 2013), bahan ini ditambahkan ke dalam karet dengan tujuan untuk membantu proses pencampuran, menaikkan elastisitas, menambah daya rekat, atau untuk menggantikan suatu porsi karet hidrokarbon tanpa kehilangan sifat fisik karet.

2.5.6 *Bis-(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfide (JH-S69)*

Bahan komposit sering diperkuat dengan serat anorganik atau pengisi partikel untuk meningkatkan sifat mekanik. Kedua bahan yang berbeda ini tidak dapat kompatibel satu sama lain dan kemungkinan *debonding* pada antarmuka mereka sehingga dapat mengakibatkan melemahnya struktur komposit. Untuk mengatasi masalah ini, beberapa bahan lain telah dicoba untuk meningkatkan kekuatan ikatan antara pengisi dan matriks polimer, yang disebut sebagai *coupling*

agent. *Coupling agent* harus memiliki kemampuan untuk melekat pada kedua permukaan melalui gugus fungsi yang berbeda (Konakanchi dkk., 2017).

Silica adalah salah satu bahan pengisi yang umum digunakan pada penguat elastomer, terutama untuk aplikasi *non-black*. Untuk meningkatkan sifat dinamis dan mekanik karet yang diisi *silica*, *silane coupling agent* digunakan. *Silane coupling agents* adalah bahan tambahan reaktif yang memodifikasi permukaan bahan pengisi anorganik (POH dan NG, 1997).

Penggunaan *coupling agents* memberikan beberapa keuntungan, yaitu:

1. Penumpukkan panas dan histerisis yang lebih rendah dalam kompon berisi *silica*
2. Meningkatkan 300% modulus dan kuat tarik pada kompon *silica*
3. Meningkatkan efek penguat tanah liat dan memutihkan
4. Berfungsi sebagai penghambat pengembalian dalam keseimbangan sistem kematangan

Mekanisme penguatan *silane coupling agent* terdiri dari 2 fase : (1) reaksi hidrofobasi dimana *coupling agent* bereaksi dengan *silica*, dan (2) pembentukan *crosslink* di antara *silica* dan *polymer* modifikasi (Rodgers, 2005). Permukaan *silica* yang mengandung kelompok silanol dan siloxane bersifat polar dan hidrofilik. Sifat hidrofilik ini menghasilkan interaksi antar *filler* yang kuat dengan ikatan hidrogen yang menyebabkan dispersi lemah dalam kompon karet. Terlebih lagi, gugus silanol bersifat asam dan berinteraksi dengan akselerator dasar, menyebabkan efek yang merusak seperti waktu kematangan yang lama, laju kematangan lambat, dan juga menurunkan densitas pada karet yang diperbaiki *sulfur* (Chonkaew dkk., 2011). Jenis *silane coupling agent* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 11.

Silane coupling agents meningkatkan kompatibilitas kimia bahan pengisi *non-black* dengan matriks karet untuk penguatan yang lebih efisien (Pajarito, 2019). Polimer organik dan *clay* anorganik secara kimia tidak kompatibel. Kompatibilitas kimia di antara tanah liat anorganik dan polimer organik ini dapat dicapai dengan mengubah sifat tanah liat (Gopi dkk., 2011), yaitu dengan dengan penambahan bahan kimia berupa JH-S69. Menurut Chemspec (2018), *silane*

coupling agent memiliki beberapa jenis yang mana salah satunya adalah JH-S69. JH-S69 umumnya digunakan untuk meningkatkan modulus dan kuat tarik karet, mengurangi viskositas kompon, dan menghemat proses konsumsi energi.



Gambar 11. *Silane Coupling Agent* (JH-S69)

2.5.7 *Polyethylene Glicol* (PEG) 4000

Silica memiliki kuantitas kelompok *hydroxyl* yang besar pada permukaannya, sehingga interaksi antar *filler* terjadi di antara *silica* melalui ikatan hidrogen. Interaksi ini mengurangi dispersi *silica* dalam matriks karet dan menyebabkan adsorpsi akselerator polar pada permukaan *silica*. Oleh karena itu, beberapa akselerator tidak ikut dalam reaksi *crosslinking*, dan derajat *crosslinking* berkurang karena kompon karet/*silica*. Oleh karena itu, *Polyethylene Glicol* (PEG) telah digunakan secara luas untuk mencegah kehilangan akselerator karena gugus polar dalam *silica*, yang meningkatkan dispersi *silica* (wook-soo dkk., 2011). PEG memiliki jumlah rantai karbon yang membentuk ikatan hidrogen dengan gugus silanol pada *silica*. Oleh karena itu, PEG digunakan untuk mengurangi interaksi antar *filler* dan mencegah kehilangan akselerator (Wook-soo dkk., 2011).

Ada banyak bahan (*fatty acid*, *accelerators*, *amine antioxidants*) yang berpotensi dalam proses adsorpsi pada permukaan silika dalam vulkanisasi karet, Solusi umum pada masalah adsorpsi ini telah menjadikan tambahan PEG ini untuk bertindak sebagai *buffer* permanen di antara *silica* dan bahan-bahan lainnya. Pelapisan permukaan silika ini dimaksud untuk menutupi area adsorpsi dan menstabilkan permukaan dasar. Oleh karena itu, dengan mencegah mekanisme

penonaktifan ini, formulasi karet berisi *silica* menunjukkan reaksi dengan cara yang lebih konvensional. Penambahan PEG telah dilaporkan meningkatkan sifat-sifat seperti laju *cure*, *scorch*, viskositas, *hardness*, *trouser tear*, *compression set*, *heat build up* dan indeks abrasi (Kraleovich dan Koenig, 1997). Jenis PEG yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. *Polyethylene Glycol (PEG) 4000*

Menurut hasil penelitian pada aplikasi PEG pada NR/*Clay nanocomposites*, PEG terletak di antara lapisan *silica*, yang mengurangi sifat hidrofilik *silica* dan meningkatkan dispersi *silica* dalam matriks karet. Selain itu, adanya rantai PEG pada kation yang dapat bertukar di antara lapisan tanah liat ini mencegah adsorpsi *vulcanizing agent* dan meningkatkan derajat *crosslinking*. Sebagai hasilnya, modulus 100%, modulus 300%, dan kuat tarik nanocomposites karet/*clay* meningkat (Wook-soo, 2011). PEG or *polyethylene glycol 4000* digunakan dalam berbagai aplikasi karena struktur kimianya, toksisitas yang rendah, kemampuan larutnya dalam air, sifatnya sebagai pelumas (*lubricant*). PEG memberikan fleksibilitas dalam memilih sifat untuk memenuhi syarat dari berbagai aplikasi. Dalam industri karet, PEG berfungsi sebagai agen transfer panas, agen rilis cetakan, pengompon karet, pelumas, dan pemberi pigmen (Chemspec, 2018).

Polyglycols adalah bahan aditif yang dapat membuat permukaan *silica* menjadi tidak *hydrophilic*. *Polyglycol* memiliki sejumlah rantai *ether* besar, yang membentuk ikatan hidrogen dengan gugus silanol pada permukaan *silica*. Aplikasi

polyethylene glycol (PEG) dalam kompon karet alam menyebabkan peningkatan dispersi *silica* dalam matriks elastomer. Peningkatan dicapai dengan interkalasi (penambahan) PEG di antara lapisan *silica* yang mengakibatkan penurunan sifat hidrofilik. Terlebih lagi rantai PEG di antara lapisan *silica* mencegah adsorpsi dari *curing agents* yang mengakibatkan peningkatan derajat *crosslinking* (Kratina dkk., 2019).

2.5.8 Retarder (PVI)

Bahan kimia yang ditambahkan pada kompon karet agar dapat memperlambat reaksi vulkanisasi. Akan tetapi, penggunaan *retarder* yang terlalu banyak akan membuat kompon yang dihasilkan menjadi lebih lengket. Oleh karena itu, *retarder* yang diperlukan pada proses pengomponan hanya sedikit. Jenis *retarder* yang digunakan pada penelitian ini adalah *prevulcanization inhibitor* (PVI)

2.6 Sifat Fisik Vulkanisat Karet

Uji sifat fisik yang biasa digunakan pada kompon karet adalah uji pampatan tetap (*compression set*), uji kepegasan pantul (*rebound resilience*), uji ketahanan retak lentur (*flex cracking resistance*), dan uji kekerasan (*hardness*). Adapun standar sifat fisik yang harus dipenuhi untuk produk harus dipertimbangkan dengan standar yang cukup tinggi agar dapat memenuhi spesifikasi. Tabel 3 menjelaskan standar sifat fisik yang harus dipenuhi vulkanisat karet.

Tabel 3. Standar Sifat Fisik Vulkanisat Karet

<i>Property</i>	<i>Testing Standard</i>	<i>Condition</i>	<i>Vulcanizate Requirement (SNI)</i>
<i>Hardness</i>	<i>ASTM D 2240</i>	<i>Original</i>	<i>55-75 Shore A</i>
<i>Compression Set</i>	<i>ASTM D395 Method B</i>	<i>22 hours at 70°C</i>	<i>30% (max)</i>
<i>Flex Cracking Resistance</i>	<i>ASTM D 430</i>	<i>150 kcs</i>	<i>No cracking</i>
<i>Rebound Resilience</i>	<i>ISO 4662 (LUPKE)</i>	<i>Original</i>	<i>± 30%</i>

(sumber: DSN, 1987)

2.6.1 Pampatan Tetap (*Compression Set*)

Pengujian pampatan tetap dilakukan untuk mengetahui sifat elastis vulkanisat karet setelah ditekan pada waktu dan kondisi tertentu. Terutama untuk vulkanisat yang dalam pemakaiannya mengalami penekanan (Basseri, 2005). Menurut Sidabutar dan Pangapoi (2013), Karet akan berubah bentuk pada saat diberi beban dan jarang untuk kembali sepenuhnya ke dimensi aslinya ketika beban yang diberikan dihilangkan.

Uji pampatan tetap dimaksudkan untuk mengukur kemampuan kompon karet dalam mempertahankan sifat elastis setelah proses *compressive stress* yang berkepanjangan. Kinerja penekanan aktual bisa meliputi proses dalam mempertahankan defleksi tertentu. Penerapan yang terus menerus dengan kekuatan yang diketahui, atau perubahan bentuk dan pemulihan berulang kali dengan cepat yang dihasilkan dari kekuatan tekan *intermitten* (berselang-seling). Meskipun penekanan dinamisnya terakhir, seperti yang lainnya, menghasilkan pampatan tetap (*compression set*). efeknya secara keseluruhan disimulasikan dengan lebih dekat oleh uji pelenturan tekan atau histerisis. Uji ini sering dilakukan pada temperatur tinggi (ASTM, 2017). Oleh karena itu, uji pampatan tetap sebagian besar dianggap dapat diterapkan untuk memeriksa kondisi yang memerlukan penekanan.

Uji pampatan tetap yang digunakan adalah American Standard Testing and Material (ASTM) D.395-16^{e1}, potongan *cured rubber* diukur karena kecenderungannya untuk membawa beban baik melalui *constant force* (Metode A) maupun *constant strain* (Metode B) di bawah kondisi suhu standar, waktu, persen defleksi yang dipilih (untuk Metode B) dan *recovery time*. Biasanya Metode B adalah prosedur yang paling umum digunakan, sementara vulkanisat yang sangat keras hanya dapat diuji dengan Metode A (Dick, 2003).

Compression set digunakan oleh pabrik segel untuk memastikan seberapa baik suatu kompon karet menahan beban. Gambar 13 menunjukkan alat yang digunakan untuk mempersiapkan spesimen karet untuk pengukuran pampatan tetap dengan menerapkan *constant strain* (Dick, 2003). Pada uji ini karet dibentuk silinder dan digunakan sebagai sampel yang bisa ditekan pada temperatur normal atau tinggi sampai tinggi yang telah ditentukan sebelumnya (dalam hal persentase)

dan diukur setelah penekanan selama jangka waktu 24 jam. Uji ini berguna untuk komponen karet yang harus berfungsi di bawah kompresi contohnya *rubber heels*, *compression buffer*, dan lain sebagainya (NIIR Board, 2006).

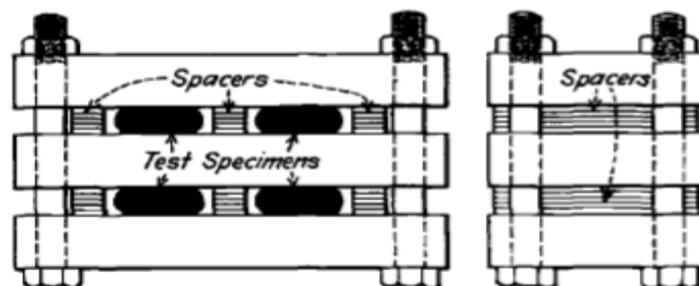
Metode uji ini mencakup pengujian karet yang dimaksudkan untuk penggunaan dalam aplikasi dimana karet akan dikenakan *compressive stresses* di udara atau media cair. Uji ini dapat diterapkan khususnya pada karet yang digunakan pada *machinery mounting*, *vibration damper*, dan *seals*. Ada tiga metode uji yang tercakup dalam menentukan sifat pampatan tetap pada karet (Dick, 2003), yaitu :

A- *Compression Set Under Constant Force in Air*

B- *Compression Set Under Constant Deflection in Air*

C- *Compression Set Under Constant Deflection in Air Considering Material Hardness*

Metode uji pampatan yang digunakan pada penelitian ini adalah metode B *Compression Set Under Constant Deflection in Air*.



Gambar 13. Alat Uji Pampatan Tetap (*Method B*)

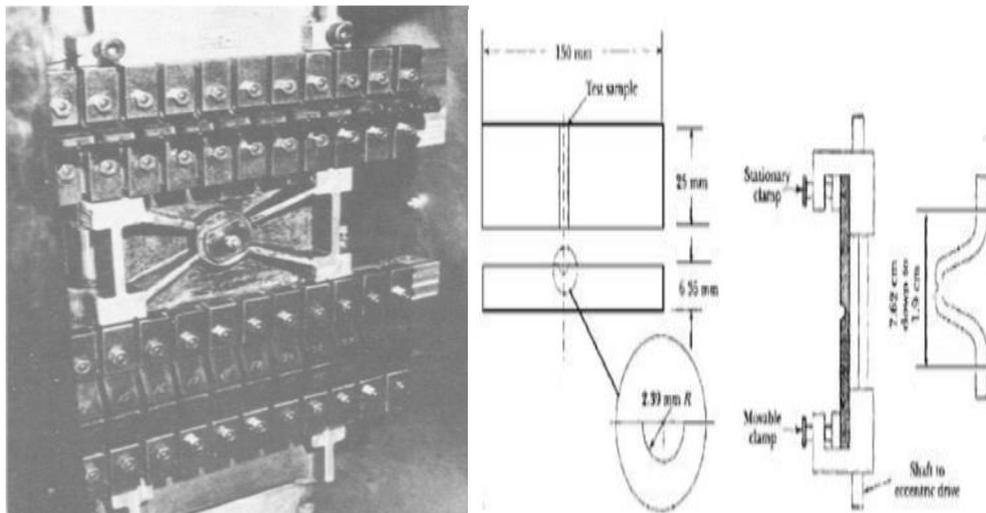
(Sumber: Dick, 2003)

2.6.2 Ketahanan Retak Lentur (*Flex Cracking Resistance*)

Banyak produk karet harus menahan siklus pelenturan berulang tanpa rusak. Selama pelenturan, retakan kecil mungkin muncul pada permukaan dan semakin besar dan dalam sampai menjadi cukup besar sampai menyebabkan kerusakan. Oleh karena itu, informasi mengenai retak lentur ini penting untuk merancang komponen menjadi *tyre treads*, *belt covers*, *boot upper*, dan lain sebagainya (NIIR Board, 2006).

Flex cracking telah didefinisikan sebagai kejadian dan pertumbuhan retakan dalam permukaan karet ketika berulang kali dikenakan pada putaran

perubahan bentuk. Beberapa mesin uji di laboratorium tersedia seperti *abrasion resistance*, ini mungkin tidak memberikan penilaian yang benar. Oleh karena itu, perlu sangat sering menggunakan produk aktual untuk memeriksa tipe uji. Dua mesin populer ini adalah *De Mattia Machine* dan *The Flipper Machine* (NIIR Board, 2006).



Gambar 14. *De Mattia Machine Flex Cracking Device*
(sumber: NIIR Board, 2006)

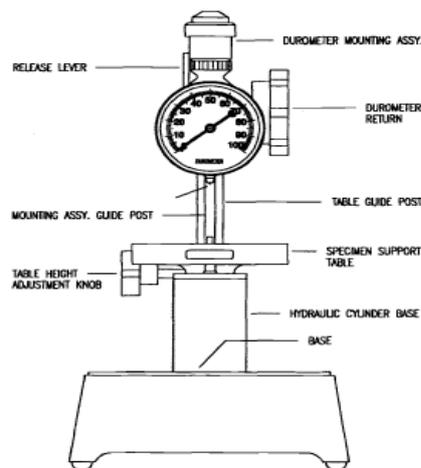
De Mattia Machine merupakan mesin yang paling banyak digunakan untuk vulkanisat karet lembut sampai 70 *International Rubber Hardness Degree* (IRHD). Mesin ini terdiri atas pegangan tetap dan pegangan bolak-balik *parallel* sejajar yang menjepit sampel terbentuk. Salah satu pengapit bergerak pada kecepatan tinggi dengan mekanisme retakan dan pengaturan, jarak di antara penjepit dan pukulan dapat divariasikan untuk memberikan derajat pelenturan (*flexing*) yang berbeda. Pegangannya diatur sehingga mendekati satu sama lain pada jarak 18 mm dan terpisah sampai maksimum 75 mm pada laju 7500 mm/min. Benda ujinya berbentuk kepingan datar, dengan lekuk setengah lingkaran dan bentuk melintang dimana regangan dipusatkan ketika benda uji ditekuk dengan mendekatkan kedua ujungnya (NIIR Board, 2006). Retak yang diamati dibandingkan dengan serangkaian deskripsi dan foto yang terkandung dalam standar. Alat ketahanan retak lentur dapat dilihat pada Gambar 14.

Uji ketahanan retak lentur yang digunakan adalah ASTM D.430-06(ra2012). Ketahanan retak lentur ini mengukur kecenderungan kompon *cured*

rubber untuk membentuk retakan dengan dilenturkan berulang kali pada kondisi standar. Ketahanan retak lentur tidak dapat diprediksi dengan sangat baik dari pengukuran sifat dinamisnya. ASTM D 430 hanya satu dari beberapa metode pengukuran pada sifat ini. Ada beberapa metode lain yang juga bisa digunakan. Uji retak lentur yang berbeda ini semuanya memberikan hasil yang berbeda (Dick, 2003).

2.6.3 Kekerasan (*Hardness*)

Kekerasan (*hardness*) menggambarkan tingkat kekerasan dari suatu benda terhadap beban yang diberikan padanya. Tingkat kekerasan suatu benda dapat ditentukan dari tingkat kerapatan bahan yang membetuknya (Nasrudin, 2017). Kekerasan merupakan perlawanan permukaan karet atas gaya yang diberikan dan diukur dengan *hardness tester* yang menggunakan satuan *shore A* (Hasan, 2013).

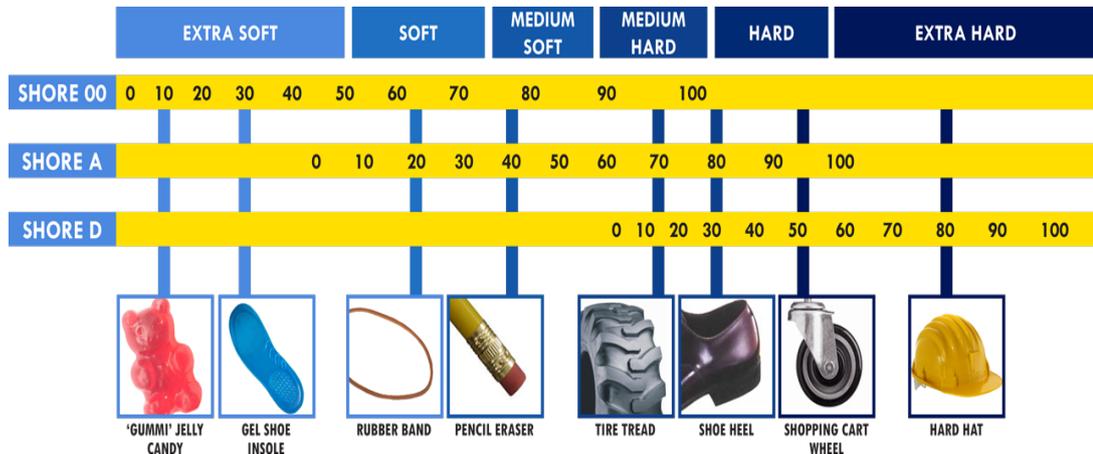


Gambar 15. *Device for Hardness Test Mounted Durometer*
(Sumber: Dick, 2003)

Uji kekerasan karet (*rubber hardness*) yang digunakan adalah ASTM D.2240 *Shore A* yang disebut *durometer*. Alat ini mengukur kekerasan dari sampel *cured rubber* dengan cepat melalui penetrasi *indentor* khusus. *Durometer* ini dapat dipasang atau dipegang dengan tangan. Alat ini cepat, tetapi merupakan alat dengan cara yang sederhana untuk menentukan jika sampel karet telah mencapai densitas ikatan silang yang diberikan (*crosslink density*) dari proses *curing*. Metode ini cepat tetapi presisinya tidak sebaik beberapa metode lainnya. Kemampuan pengulangan *durometer* biasanya lebih rendah daripada pengukuran torsi maksimum dari *rotorless curemeter* (ASTM D 5289). Akan tetapi

pengukuran kekerasan *durometer* ini jauh lebih cepat (ASTM, 2016). Alat *durometer* ini dapat dilihat pada Gambar 15.

Ada *skala shore* yang berbeda untuk mengukur kekerasan material yang berbeda. *Skala shore* kekerasan ini dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16. Skala *Shore Hardness*
(sumber: Smooth-on, 2019)

1. *Shore 00*

Skala kekerasan *shore 00* ini mengukur kekerasan karet dan *gels* yang sangat lembut.

2. *Shore A*

Skala kekerasan *shore A* ini mengukur kekerasan karet cetak *flexible* mulai dari yang sangat lembut dan *flexible*, sampai medium dan sedikit *flexible*, sampai keras dengan hampir tak ada *flexibility* sama sekali. Plastik *semi-rigid* juga dapat diukur pada akhir skala *shore A* kelas atas.

3. *Shore D*

Skala kekerasan *shore D* ini mengukur kekerasan karet yang keras, *semi-rigid plastics* dan *hard plastics*.

2.6.4 Kepegasan Pantul (*Rebound Resilience*)

Rebound resilience merupakan bentuk uji dinamis sederhana dimana benda uji hanya dikenakan setengah putaran deformasi. Ketegangan diaplikasikan dengan memberikan kontak paksa benda uji dengan *indenter* yang bebas memantul setelah kontak paksa.

Kepegasan pantul didefinisikan sebagai rasio energi indentor setelah kontak paksa dengan energi sebelum kontak paksa (*impact*) yang dinyatakan sebagai persentase. Karenanya, dalam kasus dimana *indentor* jatuh karena gravitasi, itu sama dengan rasio ketinggian pantul terhadap ketinggian jatuh, yang mana pengukuran ini digunakan pada banyak alat. Kepegasan juga sama dengan rasio kuadrat kecepatan sebelum dan setelah *impact*, dan gerbang waktu telah ditambahkan pada alat untuk memungkinkan otomatisasi pembacaan data (ISO, 2017). Alat uji kepegasan pantul dapat dilihat pada Gambar 17.

Untuk *pendulum* dimana gaya yang kembali disebabkan oleh gravitasi, kepegasan pantul, R, diberikan rumus 1:

$$R = \frac{h}{H}$$

Dimana

h = ketinggian pantulan

H = ketinggian jatuh

Ini biasanya mudah bagi skala baik untuk mengukur jarak pantul *horizontal* maupun lengan kaku *pendulum*. Khususnya sudut pantul. Untuk *pendulum* dimana gaya yang kembali disebabkan karena kawat torsi atau untuk reaksi pegas elastis, kepegasan pantul R diberikan rumus 2:

$$R = \frac{\alpha_R^2}{\alpha_I^2}$$

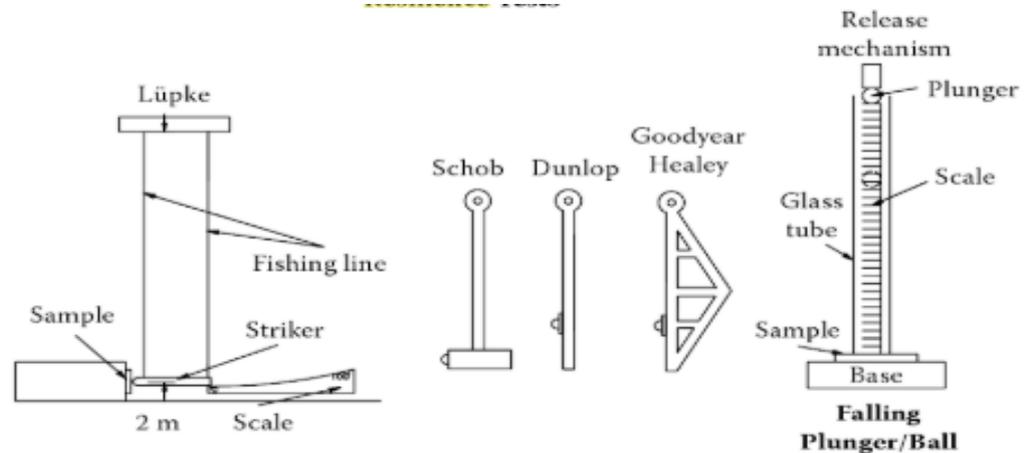
Dimana

α_R adalah sudut pantul

α_I adalah sudut *impact*

Sifat kepegasan pantul ini merupakan salah satu sifat karet yang luar biasa. Sifat ini menunjukkan kemampuan vulkanisat karet untuk mengembalikan energi yang digunakan untuk merusak bentuknya. Nilai kepegasan yang rendah berkaitan dengan friksi/gesekan internal sampai penumpukkan panas lebih besar secara berulang. Bentuk paling sederhana uji kepegasan melibatkan jatuhnya bola baja pada sampel karet dan mencatat tingginya pantulan. Ada beberapa bandul yang

dapat digunakan seperti schob, lupke, dunlop, dan goodyear-healey (NIIR Board, 2016).



Gambar 17. *Device for Rebound Resilience Test*
(sumber: NIIR Board, 2006)

Ada dua metode untuk menentukan kepegasan pantul karet dengan kekerasan yang terletak di antara 30 IRHD dan 85 IRHD. Kedua hal tersebut adalah metode *pendulum* dan metode *tripsometer*. Pada penelitian ini uji kepegasan pantul yang digunakan adalah *pendulum* lupke ISO 4662:2017. Pada metode *pendulum*, massa dengan ujung berbentuk bulat melakukan kontak paksa dengan benda uji dan dipegang dengan kuat tetapi dapat bebas mengembang. Energi kinetik dari massa yang mengenai kontak paksa diukur dengan segera sebelum dan setelah kontak paksa (ISO, 2017).

Rebound resilience akan diukur melalui alat yang terdiri dari alat osilasi mekanik seperti *pendulum* dengan 1 derajat kebebasan dan *holder* benda uji yang aman. Nilai rata-rata akan diberikan untuk pengukuran pantulan *pendulum* baik dengan skala kalibrasi maupun sinyal elektrik. Gerakan *hammer* harus diikuti baik melalui petunjuk yang meliputi sistem dan skala tetap maupun dengan sistem yang mengukur posisi atau kecepatan *hammer* untuk memberikan sinyal elektrik (ISO, 2017).

