

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1. Tinjauan Pustaka

Dalam Tinjauan Pustaka ini akan membahas penelitian – penelitian terdahulu yang terkait dengan penelitian yang akan dilakukan oleh penulis.

##### 2.1.1. Penelitian Terdahulu

*Finite Element Analysis* adalah prosedur matematis yang dapat dipakai untuk menyelesaikan masalah dalam bidang rekayasa seperti analisa tegangan – regangan pada suatu bahan. Penggunaan metode ini dilakukan pada masalah yang tidak dapat dianalisis dengan *exact solution/analytical solution*. *Finite Element Methode* adalah metode numeris yang umum digunakan untuk menyelesaikan masalah *engineering* yang kompleks. Masalah kompleks tersebut berupa masalah yang sulit diselesaikan secara analitik. Dalam *finite element analysis*, *domain* yang dianalisis didiskritisasi menjadi beberapa *subdomain* yang lebih kecil (elemen). Skema diskritisasi dan jumlah dari *subdomain* dapat mengubah secara signifikan antara waktu analisis dan akurasi solusi (Yazici & Yazici, 2008).

*Finite element analysis* dilakukan oleh Elgström (2014) untuk menyelesaikan permasalahan pada Roxtec yang membutuhkan waktu cukup lama dan hasil yang didapatkan tidak akurat dalam simulasi *rubber*. Material *rubber* yang dimilikinya mengalami masalah ketika kontak dengan material yang lebih keras dan kaku seperti besi, masalah tersebut kemudian diselesaikan oleh Elgström dengan menggunakan simulasi melalui *finite element analysis*. Elgström dalam melakukan *finite element analysis*, menggunakan metode Mooney Rivlin untuk mendapatkan konstanta yang menggambarkan karakteristik material. Elgström (2014) menggunakan *software Autodesk Simulation Multiphysics* sebagai alat bantu untuk melakukan simulasi dan *software MATLAB* untuk mendapatkan nilai parameter yang optimum.

Kim et al. (2012) melakukan penelitian mengenai model konstitutif untuk material *chloroprene rubber*. Kim dkk membandingkan dan melaporkan beberapa model yaitu Neo Hookean, Mooney Rivlin, dan Ogden. Pengujian yang digunakan untuk mendapatkan model konstitutif adalah *uniaxial test*, *biaxial test*, dan *plantar test*, ketiga uji tersebut dikombinasikan menjadi empat kombinasi oleh Kim dkk yaitu *uniaxial test* dan *biaxial test*, *uniaxial test* dan *plantar test*, *biaxial* dan *plantar test*,

yang terakhir *uniaxial* , *biaxial* dan *plantar test*. Kim dkk menyimpulkan bahwa model Ogen adalah model yang paling tepat untuk mendeskripsikan deformasi yang besar.

Cheung & Zhang (2006) membahas tentang *Finite Element Modelling of the Human Foot and Footwear* dalam penelitiannya. Keduanya berhasil melakukan pembentukan model *finite element* kaki yang digunakan untuk mengukur interaksi biomekanika antar tulang, ligamen, interaksi antara *foot plantar* dan berbagai dukungan pada variasi kondisi pembebanan. Material yang digunakan pada penelitian ini adalah Nora (*closed cell EVA foam*) dan Poron (*open cell polyurethane foam*). Kedua material tersebut merupakan yang umumnya digunakan untuk pembuatan alas kaki orthosis. Cheung dan Zhang menggunakan model *hyperelastic mooney rivlin* untuk mendeskripsikan parameter jaringan lunak, sementara untuk material Nora dan Poron, Cheung dan Zhang menggunakan model *hyperelastic ogden hyperfoam*.

Selain Cheung dan Zhang, beberapa penulis lain menggunakan material *EVA rubber foam* sebagai material untuk alas kaki. Verdejo & Mills (2004) melakukan penelitian mengenai interaksi antara bantalan tumit dan sepatu serta daya tahan *EVA foam* yang digunakan untuk *midsole* sepatu lari. Dalam penelitiannya, *EVA foam* digunakan sebagai material untuk *midsole*. Material *EVA foam* tersebut diteliti dengan menggunakan model konstitutif *ogden foam*, sementara itu untuk mendeskripsikan bantalan tumit, Verdejo dan Mills menggunakan model konstitutif *ogden*. Dalam penelitian tersebut Verdejo dan Mill memperoleh hasil bahwa terdapat tekanan yang lebih besar pada bantalan tumit yang tidak menggunakan sepatu dibandingkan bantalan tumit yang menggunakan sepatu pada kondisi gaya yang sama. Distribusi tekanan pada permukaan atas *midsole* tidak merata. Tekanan pada *midsole* menyebabkan kerusakan karena kelelahan pada *EVA foam*.

Sridharan, Rao, & Omkar (2015) melakukan penelitian mengenai *FEA* dampak dari bola kriket dengan lapisan *Polycarbonate* dan *EVA*. Dalam olahraga kriket, bola dapat melaju dalam kecepatan 25 hingga 45 m/s. Dengan kecepatan dan gaya yang dimiliki bola tersebut dapat membahayakan pemain. *Finite Element Methods* dapat menjadi alat dalam proses desain alat proteksi bagi pemain kriket. Penelitian ini meneliti mengenai kekuatan lapisan *polycarbonate* dan *EVA foam* melawan dampak dari bola kriket menggunakan *FEA*. Material *EVA foam* yang digunakan memiliki kemampuan *shock absorption* yang baik, sementara material

*polycarbonate* memiliki kemampuan tahan robek yang baik. Kombinasi ketebalan material terbaik antara *EVA foam* dan *polycarbonate* ditentukan dari seberapa kecil kontak gaya yang ditransmisi ke kulit manusia. Dalam penelitian ini software yang digunakan adalah ANSYS dengan parameter jaringan lemak menggunakan model *hyperelastic mooney rivlin*, dan untuk material *EVA foam* menggunakan model ogden *hyperfoam*.

Shariatmadari (2009) melakukan penelitian mengenai *FEA* interaksi antara kaki dan alas kaki yang menggunakan *EVA foam*. Pada penelitian ini *EVA foam* yang digunakan terdapat dua jenis yaitu *low density* dan *medium density*. Berdasarkan penelitian tersebut diperoleh hasil bahwa dengan meningkatnya densitas *foam*, maka kekakuan meningkat dan tegangan juga meningkat pada regangan yang sama. Bantalan tumit tidak mengalami penurunan yang besar terhadap ketebalan, sementara *foam* mengalami perubahan bentuk menjadi cekung. Tekanan maksimum pada kaki sebelah kiri dengan sepatu adalah 0,9 kPa, sementara tekanan maksimum tanpa sepatu 4.5 kPa. Densitas *foam* alas kaki merupakan faktor penting pada gaya yang ditimbulkan pada kaki. Gaya tekan akan lebih kecil pada *low density EVA foam* karena material tersebut lembut. *EVA foam* dengan densitas rendah mengurangi tekanan dengan mendistribusikan berat tubuh pada area kaki yang lebih luas. Peningkatan area kontak antara bantalan tumit dan *foam* memiliki efek langsung dalam pengurangan tekanan pada kaki.

Goske, Erdemir, Petre, & Budhabhatti (2006) melakukan penelitian mengenai pengurangan tekanan pada *plantar heel* dengan desain *insole* menggunakan *FEA*. Sakit pada *plantar heel* merupakan kondisi yang umum terjadi ketika dilakukan kegiatan berjalan secara terus menerus. Terdapat tiga kombinasi yang diterapkan pada penelitian ini yaitu tiga *conformity level* pada *insole* (*flat, half conforming, full conforming*), tiga ketebalan *insole* (6.3, 9.5, 12.7 mm), dan tiga macam material (Poron, Microcel Puff lite, Microcel Puff). Microcel puff merupakan *closed cell EVA foam*, sementara Poron adalah *open cell polyurethane*. Model yang digunakan untuk mendeskripsikan *heel pad* adalah model ogden, sementara model yang digunakan untuk mendeskripsikan material *foam insole* adalah model ogden *hyperfoam*. Software yang digunakan untuk *FEA* pada penelitian ini adalah ABAQUS. Melalui penelitian ini didapatkan hasil bahwa profil yang paling sesuai dengan bentuk bantalan kaki (*conforming profile*) memiliki kemampuan pengurangan tekanan pada bantalan tumit yang paling besar selama berjalan,

pengurangan tekanan selanjutnya bergantung pada *insole* yang memiliki ketebalan lebih tinggi.

Dalam melakukan *finite elemen analysis* dibutuhkan *software* untuk mensimulasi deformasi yang terjadi. Terdapat beberapa *software* yang memberi fasilitas untuk melakukan *finite elemen analysis* yaitu ANSYS, ABAQUS, Autodesk Simulation Multiphysics, dsb. Beberapa penulis menggunakan *software* simulasi untuk mendapatkan respon material terhadap perilaku yang diberikan. Dalam tesis Elgström (2014), ia menggunakan Autodesk Simulation Multiphysics karena *software* yang digunakan oleh perusahaan Roxtec adalah Autodesk Simulation Multiphysics. Mohotti, Ali, Ngo, Lu, & Mendis (2014) menggunakan *software* ANSYS untuk menentukan perilaku material pada rasio regangan yang besar. Miller (1999) menggunakan *software* ABAQUS untuk menentukan perilaku deformasi yang dialami jaringan otak terhadap penekanan. Patil (2013) menggunakan *software* ANSYS untuk menentukan dimensi optimum kedua silinder yang terbuat dari material khusus dan untuk menahan tekanan internal sehingga volume (berat) menjadi minimum.

Simulasi yang dilakukan dengan *finite element analysis* membutuhkan inputan berupa karakteristik material agar simulasi tersebut dapat dijalankan secara akurat. Inputan tersebut berupa karakteristik material yang akan menentukan deformasi yang terjadi (Karol Miller, 1999). Karakteristik material tersebut dinyatakan dalam bentuk parameter. Karakteristik material yang dibutuhkan dapat diperoleh dengan perhitungan menggunakan model konstitutif.

Gajewski, Szczerba, & Jemiolo (2015) menggunakan model konstitutif yaitu Yeoh dalam penelitiannya karena sifat metode Yeoh yang lebih unggul dibandingkan metode Neo-Hookean. Metode Neo-Hookean menurut Gajewski, dkk, merupakan metode paling sederhana dari seluruh model *hyperelastic*, dan terdapat beberapa kekurangan dari model Neo-Hookean seperti pada mode deformasi tertentu, model ini memberikan prediksi yang tidak tepat. Model Yeoh untuk material elastis *nonlinear* lebih unggul dari pada model Neo-Hookean dan mengarah pada rasional deskripsi perilaku *elastomer* untuk elongasi signifikan dan dapat diimplementasikan pada berbagai macam program *finite element method*.

Shergold, Fleck, & Radford (2006) menggunakan model Ogden untuk mendeskripsikan respon dari kulit babi pada tegangan rendah dan tegangan yang

tinggi. Model Ogden dipilih karena model mooney rivlin yang mereka gunakan tidak cocok untuk data pengujian kulit babi.

Vlasceanu et al. (2014) dalam penelitiannya tentang material *hyperelastic* seperti rubber menggunakan model Mooney Rivlin untuk menentukan parameter material. Berdasarkan jurnal Vlasceanu, dkk, model Mooney Rivlin cocok untuk material yang dapat meregang hingga 200%, sedangkan model Ogden cocok untuk material yang dapat meregang hingga 700% dan untuk material *polyurethane foam rubber*. Blatz-Ko model digunakan untuk *polyurethane foam rubber* yang dapat dimampatkan.

Dari hasil penelusuran riset yang dilakukan pada beberapa penelitian sebelumnya akan diperoleh sebuah keterbaruan akan perlunya penelitian tentang pembentukan model konstitutif dan nilai parameter yang akan digunakan sebagai inputan untuk penelitian selanjutnya yang memanfaatkan teknologi RID dan analisis *FEA* dengan teknologi CAD pada pasien yang memiliki kelainan kaki.

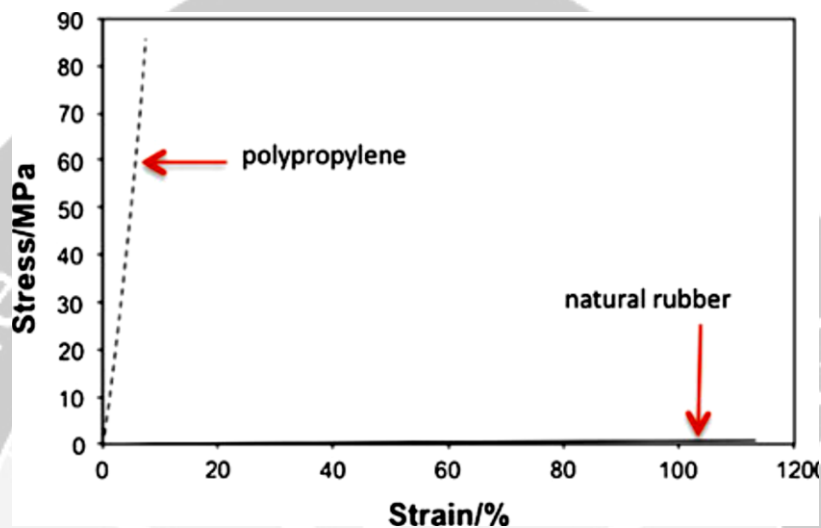
### **2.1.2. Penelitian Sekarang**

Penelitian ini bertujuan untuk menemukan model konstitutif yang sesuai dan mendapatkan parameter yang dapat mendeskripsikan karakteristik material *EVA rubber foam*. Material *EVA rubber foam* tersebut akan digunakan untuk pembuatan *insole*. Terdapat 2 material *EVA rubber foam* yang akan diteliti. Kedua material tersebut akan disimulasikan menggunakan *finite element analysis*. Model konstitutif yang didapatkan dari penelitian ini akan digunakan pada *finite element analysis* sebagai *input* bagi optimasi desain. Tujuan dilakukannya *finite element analysis* adalah untuk menghindari *trial and error*, sehingga dapat meminimalisir ongkos dan waktu produksi. Metode yang akan digunakan untuk menemukan model konstitutif karakteristik material adalah model konstitutif untuk material *hyperelastic* seperti Mooney-Rivlin, Yeoh, Ogden, Ogden *foam*. Penentuan model yang digunakan didasarkan pada karakteristik material dan studi literatur. Pengujian material yang akan dilakukan adalah *uniaxial tension test*. Uji tarik yang digunakan menggunakan metode standar ASTM D412. Hasil akhir dari penelitian ini adalah karakteristik material berupa model konstitutif, parameter material.

## 2.2. Dasar Teori

### 2.2.1. Elastomer

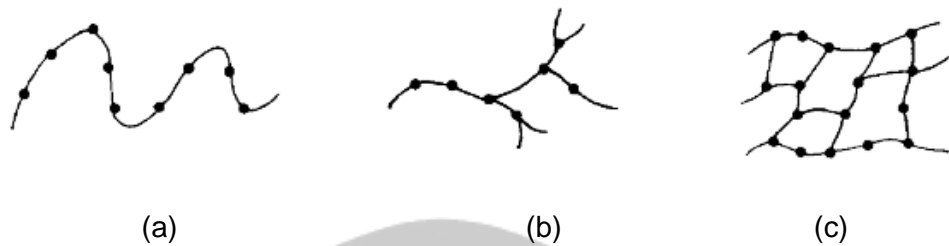
Elastomer merupakan bagian dari polimer. Elastomer memiliki sifat umum seperti tingkat elastisitas yang tinggi, *viscoelasticity*, dan *glass temperature* yang jauh di bawah suhu kamar. Material elastomer dapat menahan regangan yang besar dari tegangan dan dapat kembali ke bentuk semula ketika tegangan dikurangi.



**Gambar 2.1. Perbandingan Kurva Tegangan Regangan untuk Material *Thermoplastic* dan Elastomer (Sumber: Shanks & Kong, 2013)**

Gambar diatas menunjukkan perbandingan kurva tegangan regangan untuk karet alam (elastomer) dan polypropylene (thermoplastic). Berdasarkan kurva tersebut tampak bahwa elastomer dapat menahan regangan yang besar. Regangan elastis dapat disebabkan karena regangan ikatan kimia, deformasi sudut ikatan, deformasi struktur kristal (Shanks & Kong, 2013).

Secara umum karet dikategorikan sebagai elastomer karena sifat *hyperelastic*-nya. Karet adalah senyawa *macromolecular* yang terdiri dari banyak *makromolekul*. Setiap *macromolekul* adalah rantai panjang *macromolecular* yang dibentuk dari beberapa unit struktur kimia yang terikat oleh ikatan kovalen. Sebagai contoh, rantai *molecular* karet alam terdiri dari 1000 hingga 5000 unit struktur kimia *isoprene*. Struktur dari rantai *macromolecular* tunggal memiliki 3 bentuk dasar yaitu *linear macromolecular* (rantai lurus), *branched macromolecular* (rantai bercabang), *crosslinked macromolecular* (Zhang, 2004).



**Gambar 2.2. Bentuk Dasar Struktur *Macromolecular* (a) *Linear Macromolecular*, (b) *Branched Macromolecular*, (c) *Crosslinked Macromolecular***  
(Sumber : Zhang, 2004)

Rantai molekul dari *linear macromolecular* cukup mudah untuk berpindah dari satu ke yang lain, oleh karena itu, *linear macromolecular* dapat dilunakkan dengan panas dan dikeraskan dengan pendinginan. Karakteristik tersebut dinamakan *thermoplasticity*. Sedangkan pergerakan untuk *crosslinked macromolecular* cukup terbatas, sehingga tidak dapat meleleh dengan mudah ketika dipanaskan. Perilaku ini disebut *thermoset*. Dibandingkan dengan logam, karena secara umum memiliki karakteristik sebagai berikut (Zhang, 2004):

- a. Deformasi elastis sangat besar, sedangkan modulus elastisitas sangat kecil. Deformasi elastis karet dapat mencapai 1000%, sedangkan kebanyakan polimer hanya memiliki deformasi elastis 1% atau lebih. Logam memiliki deformasi elastis dibawah 1%. Modulus elastisitas karet hanya sebesar  $10^6$  kali lebih kecil dari pada logam, dan meningkat dalam rasio terhadap temperatur, modulus elastisitas metal berlawanan dengan karet.
- b. *Poisson's ratio* dari karet (0,49) lebih besar dari pada logam dan lebih dekat dengan *Poisson's ratio* cairan (0,5). Oleh karena itu, selama deformasi, volume karet hampir tidak berubah, hal tersebut berbeda dengan logam yang akan mengalami perubahan bentuk selama deformasi.
- c. Deformasi elastis dari *crosslinked macromolecular* bergantung pada waktu, yang disebut dengan sifat relaksasi. Sifat tersebut tidak dimiliki oleh logam.
- d. Efek *thermal* terlihat lebih jelas selama deformasi karet. Efek ini menunjukkan cepatnya peregangan karet dalam pelepasan panas dan pengembalian ke bentuk semula menyebabkan penyerapan panas.

Karet dapat memiliki sifat mekanik yang luas dengan mengubah formulasi kompon dan proses manufaktur. Kompon karet biasanya dibentuk dari karet murni dan *filler* seperti *carbon black*. Komponen tambahan dapat termasuk antioksidan, adhesi,

tahan api. Pengujian sifat fisik dapat berupa kekerasan, *ultimate tensile strength*, *ultimate elongation*, ketahanan sobek, ketahanan cuaca, ketahanan kelelahan. Setiap komposisi dari karet dapat berpengaruh terhadap sifat fisik tersebut. Semakin banyak kandungan *carbon black* dalam karet maka *ultimate tensile strength*, kekerasan, *rebound resilience* dan ketahanan sobeknya akan meningkat pula, namun *ultimate elongation* akan menurun (Dick, 2014). Karet untuk kompon terdiri dari dua macam yaitu karet alam dan karet sintesis. Karet alam merupakan karet yang berasal dari getah pohon karet (lateks), sementara karet sintesis adalah karet buatan yang diolah dari minyak bumi kemudian dipolimerisasi dan memiliki sifat yang menyerupai karet alam.

### **2.2.2. Jenis – Jenis Karet**

Karet adalah polimer yang dikenal dengan fleksibilitasnya. Pemberian gaya pada arah penarikan akan membuat molekul pada karet meregang pada arah tersebut, ketika gaya dilepaskan, secara spontan karet akan kembali ke bentuk semula. Terdapat dua jenis karet yaitu karet alam dan karet sintesis. Karet sintesis yang dikenal paling penting penggunaannya adalah *styrene-butadiene*, *polybutadiene*, *polyisoprene*, *ethylene-propylene*. Harga karet sintesis berada dalam rentang harga karet alam. Karet sintesis memiliki banyak jenis dengan stuktur kimia yang khusus, sementara karet alam hanya memiliki 1 jenis, namun dibedakan dalam beberapa tipe dan kualitas (Arayaprane, 2012).

#### **a. Karet Alam**

Karet alam diperoleh dari getah karet (lateks) beberapa jenis pohon karet seperti *Hevea Brasiliensis* dan *Parthenia Argentatum* yang diproses dengan koagulasi, pengeringan, koagulasi elektrik, dan proses lainnya. Getah karet yang diekstrak dari kulit pohon *Hevea* adalah sistem *polydispersed* (ukuran partikel yang tidak seragam walaupun beda satu fasa / jenis) koloid dari partiker karet dalam fasa cair. Dengan lateks *Hevea* kandungan karet kering bervariasi dari 28 hingga 40%., dan dapat meningkat hingga 40-50% setelah *non-tapping* dalam waktu lama. Karet yang diperoleh dari getah karet mengandung *hydrocarbon*, protein dalam jumlah kecil, *carbohydrates*, substansi seperti resin, garam mineral, asam lemak. Oleh karena keteraturan struktural yang tinggi, karet alam cenderung untuk mengkristal pada suhu yang rendah atau ketika meregang. Kristalisasi pada suhu rendah menyebabkan kekakuan pada karet, namun dapat dengan mudah dikembalikan melalui pemanasan. Kristalisasi saat peregangan memberikan ketahanan yang



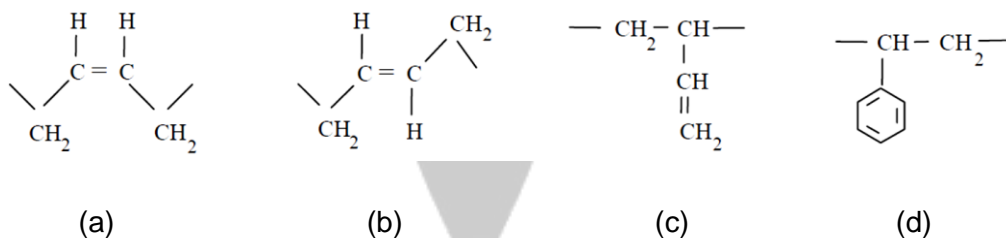
baik, fleksibilitas, kekuatan tarik dan sobek, ketahanan panas, dan abrasi. Karet mengandung protein yang dapat menyebabkan alergi pada sebagian kecil populasi. Penggunaan terbesar karet adalah ban, lebih dari 70%. Selain itu karet juga digunakan untuk *belt*, selang, *footwear*, antivibrasi, dan sebagainya (Arayaprane, 2012).

### b. Polyisoprene

Struktur dan sifat *Polyisoprene* sintesis dibuat mirip dengan karet alam. *Polyisoprene* sintesis digunakan untuk berbagai macam industri yang membutuhkan kekuatan tarik yang tinggi, ketahanan yang baik, kemampuan melekat yang baik (Arayaprane, 2012).

### c. Karet Styrene-Butadiene

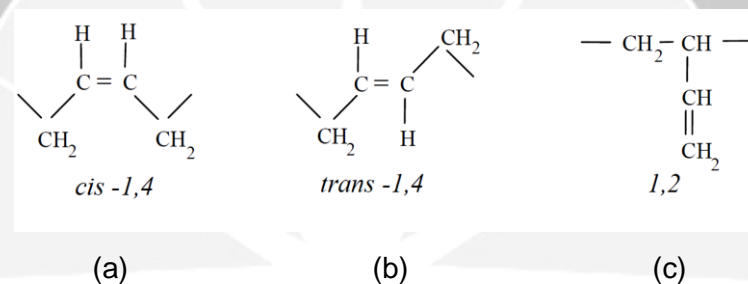
Karet *styrene-butadiene* (SBR) adalah kopolimer dari *styrene* dan *butadiene*. SBR merupakan jenis karet sintetis yang tingkat konsumsinya paling tinggi. Penggunaan utama dari SBR adalah di bidang otomotif dan industri ban yaitu sebesar 70%. Kebanyakan SBR yang diproduksi dari emulsi (E-SBR) mengandung 24% *styrene*, beberapa kualitas E-SBR mengandung 40-46% *styrene* dan memiliki sifat yang lebih kaku. Polimerisasi emulsi dilakukan dalam dua macam kondisi yaitu panas (25-50°C) atau dingin (5-25°C). SBR yang di polimerisasi dalam kondisi dingin secara umum memiliki berat molecular yang lebih besar dan ikatan antar molekul yang lebih padat dibandingkan pada kondisi panas, sehingga memiliki ketahanan abrasi yang lebih baik dan ketahanan aus serta kekuatan tarik yang lebih besar. Proses pembuatan kompon SBR secara prosedur dan penggunaan aditif mirip dengan karet alam (Arayaprane, 2012).



**Gambar 2.3. Struktural Karet Styrene-Butadiene (a) Butadiene Cis-1,4; (b) Butadiene Trans – 1,4; (c) Butadiene 1,2 (Vinyl); (d) Styrene (Sumber : Matador Rubber S.R.O, 2007)**

#### d. Karet Polybutadiene

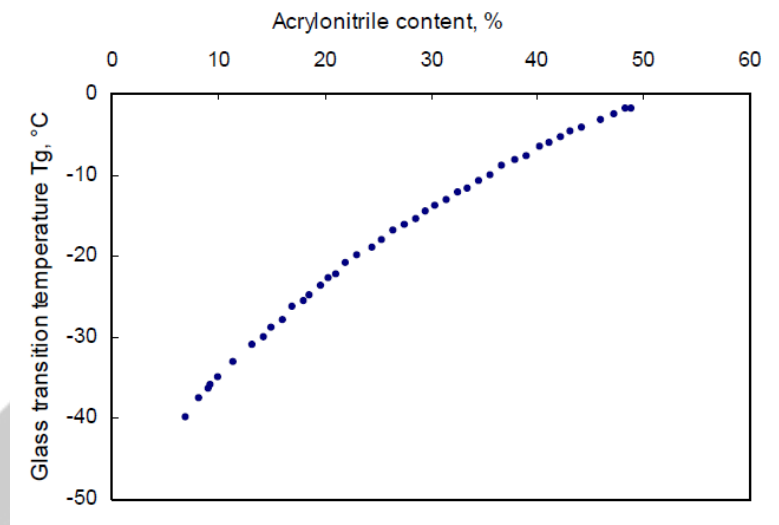
Pada awalnya *Polybutadiene rubber* (BR) dibuat dengan polimerisasi emulsi dengan hasil yang buruk karena sulit untuk diproses dan diekstrusi. Karet jenis ini berhasil dikomersialkan sejak pembuatannya dengan cara polimerisasi menggunakan stereospesifik katalis *Ziegler-Natta*. Proses tersebut memberikan hasil polimer dengan konfigurasi 90% *cis* 1,4-polubutadiene. Struktur ini mengeras pada suhu yang lebih rendah daripada karet alam dan jenis karet komersial lainnya. Hal tersebut memberikan fleksibilitas suhu rendah dan ketahanan yang lebih tinggi. Ketahanan yang dimaksud adalah berkurangnya peningkatan panas saat deformasi kontinyu yang dinamis. Penggunaan terbesar BR adalah industri ban yaitu sebesar 70%. Pencampuran BR dengan SBR atau karet alam akan meningkatkan hysteresis (ketahanan terhadap peningkatan panas), ketahanan abrasi (Arayaprane, 2012).



**Gambar 2.4. Struktural Karet *Butadiene* (a), *cis* – 1,4; (b) *trans* – 1,4; (c) 1,2 (Sumber : Matador Rubber S.R.O, 2007)**

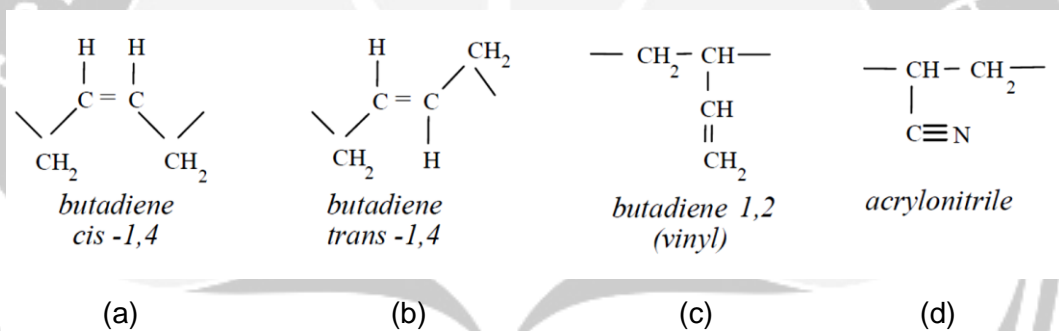
#### e. Karet Nitril

Karet *Acrylonitrile butadiene* (NBR) merupakan kopolimer dari *acrylonitrile* dan *butadiene*. Sifat khusus mereka adalah ketahanan terhadap pelarut non polar, lemah, minyak, dan pelumas mesin. Sifat NBR tergantung pada kadar *acrylonitrile* yang dimilikinya. Ketahanan terhadap pelarut non polar akan meningkat seiring dengan meningkatnya kandungan *acrylonitrile*. Pada saat yang sama *glass transition temperature* dan *brittle temperature* akan meningkat. Hal tersebut akan menyebabkan elastisitas dan fleksibilitas menurun pada suhu rendah, namun meningkatkan proses kompon NBR karena meningkatnya thermoplastilitas. Karet yang sering diproduksi memiliki kadar *acrylonitrile* 18 – 51%.



**Gambar 2.5. Hubungan Antara Kadar Acrylonitrile Dengan Glass Transision Temperature**

(Sumber : Matador Rubber S.R.O, 2007)

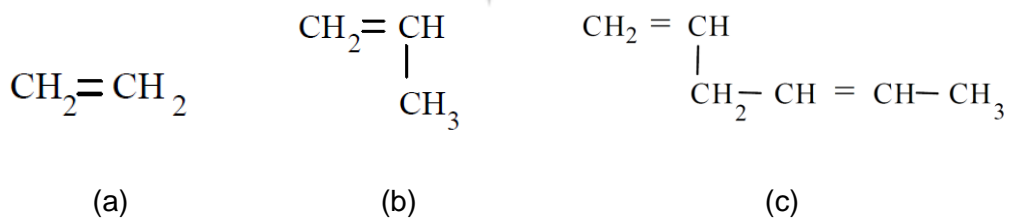


**Gambar 2.6. Struktural karet NBR (a) butadiene cis – 1,4; (b) butadiene trans – 1,4; (c) butadiene 1,2 (vinyl); (d) acrylonitrile**

(Sumber : Matador Rubber S.R.O, 2007)

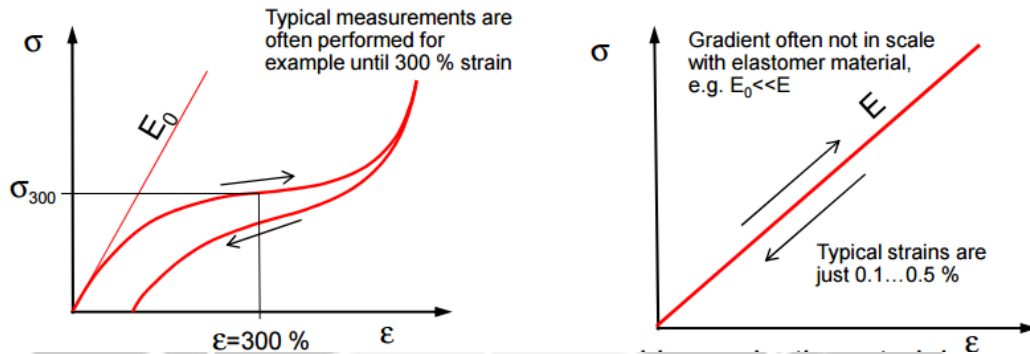
#### f. Karet Ethylene-Propylene

Karet *Ethylene-propylene* merupakan salah satu jenis karet dengan penggunaan terluas. *Ethylene-propylene* bernilai karena sifatnya yang baik dalam ketahanan terhadap panas, oksidasi, ozon dan cuaca. Sebagai karet non polar, *ethylene-propylene* memiliki daya hambat listrik yang baik, ketahanan yang baik terhadap pelarut polar seperti air, asam, alkali, *phosphate ester*, dan alkohol.





0,5 (0,499) (Jakel, 2010). Material *hyperelastic* dapat menahan deformasi yang besar dan dapat meregang hingga 700%, oleh karena itu material *hyperelastic* memiliki sifat *nonlinear*, hal tersebut tampak pada gambar grafik 2.



**Gambar 2.8. Tegangan – Regangan Material (a) material *hyperelastic*; (b) material *linear elastic* (Sumber : Jakel, 2010)**

Regangan didefinisikan sebagai berikut :

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \dots\dots\dots (1)$$

Dimana  $\varepsilon$  adalah regangan,  $l_1$  adalah panjang akhir (cm), dan  $l_0$  menunjukkan panjang awal (cm).

Rasio regangan ( $\lambda$ ) didefinisikan sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} = \frac{l_1 - l_0 + l_0}{l_0} = \varepsilon + 1 \dots\dots\dots (2)$$

Dimana  $\lambda$  adalah rasio tegangan,  $l_1$  adalah panjang akhir (cm), dan  $l_0$  menunjukkan panjang awal (cm).

Tegangan didefinisikan sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (3)$$

Dimana  $\sigma$  adalah Tegangan (Kg/cm<sup>2</sup>), F adalah beban (Kg), A adalah luas area (lebar x tebal).

### 2.2.5. Model *Hyperelastic*

Dalam material *hyperelastic* terdapat beberapa model yang dapat digunakan untuk mendefinisikan sifat *nonlinear*. Beberapa model tersebut dirangkum dalam jurnal Aidy Ali (Ali, Hosseini, & Sahari, 2010) dan Kim Beom Keun (Kim et al., 2012) sebagai berikut:

#### a. Polinomial

Polinomial adalah model yang dapat digunakan untuk material dengan regangan mencapai 300%. Fungsi dari polinomial tersebut adalah sebagai berikut:

$$W = \sum_{i+j=1}^n C_{ij}(I_1 - 3)^i(I_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^N \frac{1}{Dk}(J - 1)^{2k} \dots\dots\dots (4)$$

Dimana  $C$  dan  $Dk$  adalah konstanta material,  $C$  mendeskripsikan perilaku deformasi material, sementara  $Dk$  menunjukkan kompresibilitas,  $Dk = 0$  bila material tersebut *incompressible*.  $I_1, I_2$  adalah invariant pertama dan kedua dari tensor deformasi *Cauchy green*.  $J$  menunjukkan rasio volume elastis.

#### b. Neo-Hookean

Model Neo-Hookean adalah model untuk material *hyperelastic* yang dapat digunakan untuk memprediksi perilaku tegangan – regangan material. Model ini mirip dengan hukum Hooke. Untuk material pada umumnya, hubungan antara tegangan dan regangan pada awalnya linear, namun pada beberapa poin, kurva tegangan – regangan berubah menjadi *nonlinear*. Model Neo-Hookean adalah salah satu model yang paling sederhana. Berikut fungsi densitas energi regangan:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + \frac{1}{D}(J - 1)^2 \dots\dots\dots (5)$$

Dimana  $C$  adalah konstanta material, dan  $I_1$  adalah invariant pertama dari tensor deformasi *Cauchy green*. Model Neo-Hookean tidak dapat memprediksi dengan akurat fenomena pada regangan yang besar. Model ini hanya cocok untuk regangan sampai dengan 30%.

#### c. Mooney Rivlin

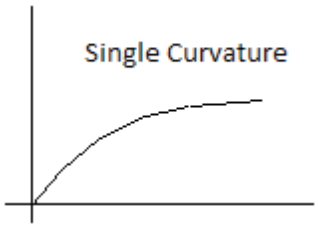
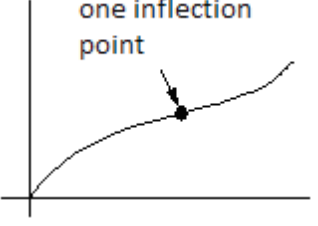
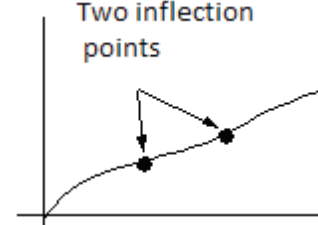
Mooney Rivlin merupakan model *hyeperelastic* yang pertama kali diperkenalkan oleh Melvin Mooney pada tahun 1940 kemudian dilengkapi oleh Ronald Rivlin. Model Mooney Rivlin memiliki batasan yaitu hanya dapat memprediksi perilaku material pada beberapa macam tingkat regangan yang dihasilkan oleh parameter untuk setiap tingkat regangan yang akan diperoleh dengan menggunakan *curved*

*fitting method* (Mohotti et al., 2014). Model Mooney Rivlin dapat digunakan untuk material yang meregang dari 30 hingga 200% (Mohotti et al., 2014). Energi regangan  $W$  didefinisikan sebagai fungsi dari prinsip invarian regangan sebagai berikut (Rivlin, 1947):

$$W = \sum_{i,j=0}^n C_{ij}(I_1 - 3)^i(I_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^q \frac{1}{D_k}(J - 1)^{2k} \dots\dots\dots (6)$$

Mooney Rivlin mendeskripsikan material dengan beberapa macam jumlah parameter, yaitu 2, 3, 5, 9 parameter.

**Table 2.1. Jumlah Parameter Berdasarkan Kurva Tegangan Regangan  
(Sumber : Mohotti et al., 2014)**

Kurva Tegangan - Regangan	Jumlah parameter
 <p>Single Curvature</p>	2 atau 3 parameter
 <p>one inflection point</p>	3 atau 5 parameter
 <p>Two inflection points</p>	5 atau 9 parameter

**d. Ogden**

Ogden adalah model yang digunakan untuk memprediksi perilaku tegangan – regangan material yang tidak linear seperti karet atau polimer. Ogden diperkenalkan pertama kali pada tahun 1972.:

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \dots\dots\dots (7)$$

Dimana  $\lambda_j$  ( $j = 1,2,3$ ) adalah principal rasio tegangan,  $\mu_i$  dan  $\alpha_i$  secara empiris menentukan konstanta material.

Ogden merupakan model yang paling sering digunakan, dan sering diterapkan untuk analisis komponen karet seperti *O-ring* dan *seal*. Ogden memiliki perbedaan dengan model lain (Neo-hookean dan Mooney-Rivlin) dari segi invariant. Model Ogden baik untuk material dengan regangan mencapai 700%. Dalam analisis perilaku komponen karet, model Ogden khususnya model 3 orde mendeskripsikan dengan sangat baik data test dari pada Mooney Rivlin. Hal tersebut dikarenakan eksponen dari rasio peregangan model Ogden disusun berdasarkan data aktual, sedangkan eksponen dari rasio peregangan model Mooney Rivlin disusun dari *integer*. Oleh karena itu model Ogden memiliki fleksibilitas yang lebih baik dalam mendeskripsikan kurva dari pada model Mooney Rivlin.

**e. Arruda dan Boyce**

Model fisik seperti Arruda Boyce didasarkan pada penjelasan dari jaringan rantai molekul. Energi regangan diasumsikan sama dengan jumlah dari energi regangan dari setiap rantai individu. Model Arruda Boyce didefinisikan sebagai berikut:

$$W = \mu \sum_{i,j=0}^5 \frac{C_i}{\lambda_m^{2i-2}} (I_1^i - 3^i) + \frac{1}{D} \left[ \frac{J^2-1}{2} - \ln(J) \right] \dots\dots\dots (8)$$

Dengan

$$C_1 = \frac{1}{2}, C_2 = \frac{1}{20}, C_3 = \frac{11}{1050}, C_4 = \frac{19}{7000}, C_5 = \frac{519}{673750} \dots\dots\dots (9)$$

Dimana  $\mu$  adalah modulus geser awal,  $\lambda_m$  adalah regangan ketika jaringan rantai polimer terkunci, regangan ini pada kurva tegangan regangan berada ketika tegangan mulai meningkat tanpa batas. Jika  $\lambda_m = \textit{infinite}$ , maka model Arruda Boyce menjadi model Neo-Hookean. D adalah konstanta material dimana  $= \frac{2}{K}$ , K adalah modulus bulk, untuk material *incompressible* D=0.

**f. Ogden Foam**

Beberapa model *hyperelastic* material telah dikembangkan untuk material *incompressible*. Material *incompressible* adalah material yang tidak mengalami perubahan pada volume material selama deformasi. Material *incompressible* ini memiliki *poisson ratio* mendekati 0,49. Contoh material yang memiliki sifat *full incompressible* atau *nearly incompressible* adalah karet dan jaringan tubuh.



Ogden meneliti model *hyperelastic* untuk material *compressible* seperti *foam*, dan berhasil mengembangkan model *hyperelastic compressible* dengan rumusan sebagai berikut (Abaqus, 2012):

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} \left( \lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} ((J^{el})^{-\alpha_i \beta_i} - 1) \right) \dots \dots \dots (10)$$

Dimana N menunjukkan order dari model hyperelastic, sementara  $\mu$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  menunjukkan parameter material.  $\lambda$  menunjukkan regangan yang terjadi dan  $J^{el}$  menunjukkan *elastic ratio volume*.

Koefisien  $\mu_i$  berhubungan dengan *shear modulus* awal,  $\mu_0$

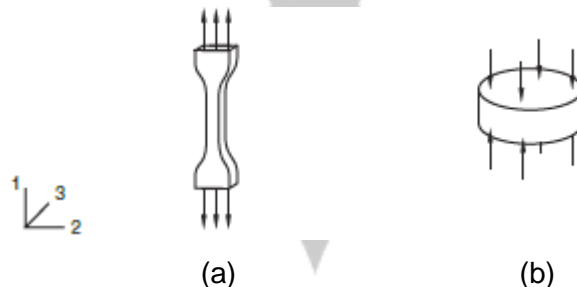
$$\mu_0 = \sum_{i=1}^N \mu_i \dots \dots \dots (11)$$

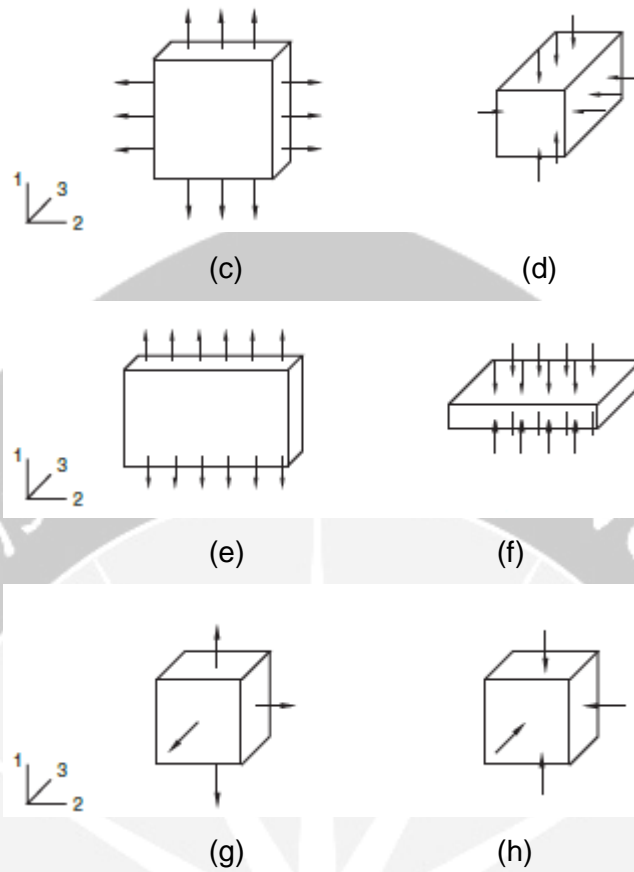
Koefisien  $\beta_i$  menunjukkan kompresibilitas material yang berhubungan dengan *poisson ratio* ( $\nu$ )

$$\beta_i = \frac{\nu_i}{1-2\nu_i} \dots \dots \dots (12)$$

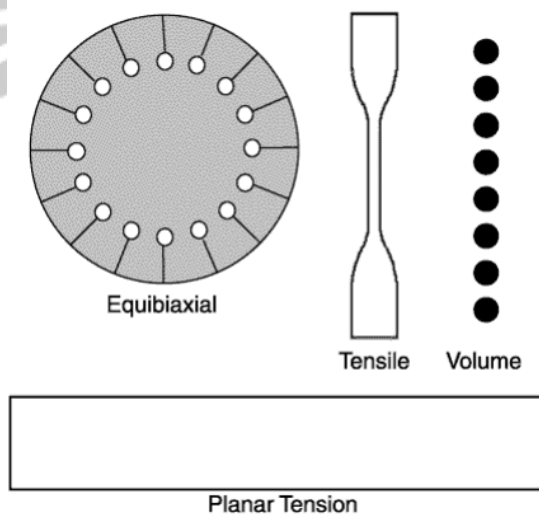
**2.2.6. Uji Karakter Material**

Pengujian material dapat dilakukan dengan 4 macam pengujian dasar yaitu *uni-axial*, *bi-axial*, *planar*, dan *volumetric* (Abaqus, 2012). Setiap uji tersebut dapat dilakukan dengan uji tarik ataupun uji tekan. Penentuan parameter material dapat dilakukan cukup dengan salah satu uji maupun kombinasi dari beberapa uji tersebut. Semakin banyak uji yang dilakukan maka akan memberi hasil yang lebih akurat.





Gambar 2.9. Arah Deformasi (a) Uji Tarik *Uniaxial*, (b) Uji Tekan *Uniaxial*, (c) Uji Tarik *Biaxial*, (d) Uji tekan *Biaxial*, (e) Uji tarik *Planar*, (f) Uji tekan *Planar*, (g) Uji tarik *Volumetric*, (h) Uji tekan *Volumetric*  
 (Sumber : Abaqus, 2012)



Gambar 2.10. Susunan Potongan Spesimen dari Lembaran  
 (Sumber : Kurt Miller, 2002)