

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Penelitian Terdahulu

Peminatan satu CAD/CAM Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Atma Jaya Yogyakarta (CAD/CAM UAJY) sejak tahun 2009 sampai dengan sekarang berusaha untuk memberikan ciri khas Prodi Teknik Industri yang berbeda dibandingkan dengan Program Studi lainnya. Salah satu ciri khas yang ditetapkan adalah desain produk artistik dan *orthotic* dengan basis CAD/CAM dan CAE. Produk artistik lebih ditekankan untuk menjadi ciri khas dengan adanya *software ArtCAM* yang mampu secara cepat mendesain model cetakan atau produk yang memiliki detail kontur relief artistik yang kompleks. Jenis produk artistik yang dikembangkan oleh Prodi TI, berupa : suvenir logam, *jewelry*, *table ware*, *food & beverage* (ada beberapa penelitian tugas akhir yang sudah mencatat), namun dari semua penelitian tersebut kesemuanya lebih mengacu pada pemanfaatan CAD/CAM saja dalam upaya menghasilkan model cetakan, master pola cetakan sampai produk jadi dan belum ada satupun peneliti yang mulai membahas mengenai aplikasi CAE yang dapat digunakan untuk menganalisis dan memverifikasi hasil produk desain berbasis CAD sebelum dilakukan proses manufaktur lebih lanjut dilantai produksi.

Penelitian produk artistik di CAD/CAM UAJY dimulai dengan penentuan produk suvenir logam berciri khas kedaerahan yang telah dilakukan oleh Rosalina (2010), Andika (2010), dan Stephanie (2014) yang merujuk pada jurnal Gordon (1986). Produk suvenir logam ini sering disebut sebagai SSS, dimana menurut Gordon (1986) suvenir merupakan sesuatu perwujudan konkrit dari sebuah negara yang berwujud benda nyata. Secara fisik akan menghadirkan ingatan terhadap seseorang untuk mengingatkan kembali terhadap momen yang lalu (Gordon, 1986). Sebagai pengingat yang konkrit, suvenir mirip dengan kenang - kenangan. Namun suvenir diproduksi secara massal sedangkan kenang - kenangan merupakan benda yang tidak dapat dibeli yang memiliki makna pribadi (Gordon, 1986).

Jenis – jenis suvenir sangat beragam macamnya. Menurut Gordon (1986) suvenir dikasifikasikan menjadi 5 jenis yaitu *pictorial images* seperti kartu pos dan fotografi, *piece of the rock* yang berasal dari alam, SSS seperti miniatur, *markers*, dan *local product souvenir*. Littrell dan colleagues (1994) menjelaskan

bahwa pembeli memilih souvenir berdasarkan desain, kualitas pembuatan, dan warna yang atraktif. Souvenir memiliki nilai estetika dan mengenali siapa pembuatnya sehingga orang akan tertarik untuk membeli.

Rosalina (2010) melakukan penelitian mengenai bagaimana cara mendapatkan master dan *prototype* SSS berciri Khas kota Tegal agar dapat meningkatkan pariwisata dan nilai produksi kerajinan logam di Kota Tegal. Penelitian yang dilakukan Rosalina (2010) menghasilkan lima buah desain SSS yang berupa empat buah gantungan kunci dan sebuah jam. Penelitian yang dilakukan Rosalina (2010) kemudian dilanjutkan oleh Anggoro dan Hanandoko (2011) mengenai master desain *prototype* produk souvenir berciri khas Kota Tegal. Penelitian yang mengambil tema ciri khas kedaerahan sebagai bentuk produk SSS juga dikerjakan oleh Nugroho (2008) dengan mengambil ciri khas D.I. Yogyakarta. Penelitian ini menggunakan metode rasional untuk melakukan pengembangan produk dan riset pasar untuk mengetahui atribut produk serta desain yang diinginkan oleh pasar. *Output* yang dihasilkan oleh Rosalina (2010), Nugroho (2008), maupun Anggoro dan Hanandoko (2011) masih hanya sampai pada tahap desain 2D/2,5D dan 3D model souvenir dan *prototype* produk SSS saja. Belum ada produk jadi berupa souvenir logam dari hasil penelitian yang dilakukan.

Andika (2010) melakukan penelitian mengenai souvenir wisuda sebagai kenang – kenangan bagi alumni UAJY. Penelitian ini menggunakan mesin *spin casting* yang dikembangkan oleh Laboratorium Proses Produksi UAJY. Hasil dari penelitian berupa *prototype desk clock* UAJY yang diuji pada mesin *spin casting* dan diharapkan dapat meminimalisir cacat dan membuat tekstur yang sesuai dengan pola. Pradhana (2009) melakukan penelitian mengenai *Silicone Rubber Castaldo Gellato Fuschea* (SRCGF) dengan menggunakan metode *spin casting*. Tujuan dari penelitian ini adalah membentuk cetakan SRCGF dengan teknologi vulkanisir. Desain dari mesin vulkanisir dilakukan dengan menggunakan metode rasional dan diagram pohon. Diagram pohon digunakan untuk mengidentifikasi objek yang dibutuhkan di vulkanisir itu sendiri, dan kemudian metode rasional digunakan untuk mengatur kebutuhan teknis dari vulkanisir yang baik dan juga untuk memiliki material alternatif terbaik berdasarkan tujuan.

Selain souvenir, terdapat penelitian mengenai *jewelry* yang dilakukan oleh Stefani (2013). Tujuan dari penelitian yang dilakukan untuk mendapatkan atribut produk

dan variasi model cincin yang sesuai dengan keinginan konsumen. *Software* yang digunakan adalah *ArtCAM JewelSmith 2012*. Pembentukan *master prototype* dan cincin emas menggunakan teknologi *rapid prototyping* dan *investment casting*. Hasil dari penelitian diperoleh 9 buah variasi desain cincin, 3 buah *master prototype* dan 3 buah cincin emas. Material SRCGF juga digunakan Stefani (2013) dalam pembuatan *mold* cincin dari material *verowhite* yang telah dibuat di mesin 3D Objet Pro dan kemudian diletakan pada *molding frame* untuk dilakukan pengepresan. *Mold* yang sudah terbentuk kemudian digunakan dalam proses injeksi lilin dengan mesin *wax injector*. Setelah cincin yang terbuat dari *wax* didapatkan maka dilakukan proses pembuatan pohon lilin dan dimasukkan ke dalam *flask* sebelum masuk ke proses *investment casting*.

Pengembangan produk souvenir berbasis CAD/CAM juga dilakukan oleh Stephanie (2014) dengan tema pengembangan produk souvenir tempat kartu nama berciri khas Yogyakarta dengan studi kasus di CV Tin's Art. Perancangan ini dilakukan karena keterbatasan CV Tin's Art dalam mengembangkan produk tempat kartu nama berciri khas Yogyakarta. Metode *Quality Function Deployment (QFD)* digunakan untuk menerjemahkan kebutuhan konsumen (atribut) ke dalam *technical requirement* produk (Stephanie, 2014). *Software* CAD yaitu *ArtCAM 2012* dan *PowerSHAPE 2012* digunakan untuk mendapatkan variasi desain 3D tempat kartu nama. Teknologi CAM yang digunakan adalah dengan mesin 3D *printing* untuk mendapatkan *prototype* dan master CAM untuk diproduksi oleh CV Tin's Art. Master CAM yang sudah jadi tersebut di produksi CV Tin's Art dengan menggunakan teknologi *spin casting* untuk membuat produk souvenir tempat kartu nama berciri khas Yogyakarta dengan bahan dasar logam *pewter*. *Spin casting* merupakan proses penuangan dan pembekuan logam yang memiliki titik leleh rendah pada satu cetakan dengan menggunakan prinsip gaya sentrifugal (Balingit dan Maglaya, 2013). Material yang digunakan untuk membentuk *mold spin casting* adalah karet dengan jenis SRCGF. Sifat dari material tersebut adalah kemampuan menahan suhu berkisar antara 150 °C – 350 °C. Teknologi *spin casting* memiliki dua elemen yang fundamental yaitu *silicone rubber* dan gaya sentrifugal yang menjadi karakterisasi teknologi tersebut (Vezzetti dalam Pamungkas, 2009).

Aditya (2015) meneliti dua buah teknologi yaitu mesin *3D Printer Objet 30 Pro* yang tergolong dalam teknologi *Additive Manufacturing* dengan teknologi *spin casting*. Penggabungan ini ditujukan untuk mempercepat proses produksi souvenir

artistik. Mesin *3D printer* yang terdapat di Laboratorium Proses Produksi UAJY akan berfungsi memproduksi master produk, dan teknologi *spin casting* pada BBKB DIY menjadi metode produksi masal untuk souvenir artistik. Material cetakan yang digunakan yaitu *stv silicone rubber* dari *Castaldo Gelato* tipe *fuschea*. Material ini mencapai kematangan *silicone* pada suhu 180°C dan divulkanisir selama 1 jam. Master produk dengan material *verowhite* membutuhkan pelumas pelindung agar tidak rusak pada saat pembuatan cetakan ini. Kolaborasi yang dihasilkan dari kedua mesin ini dapat mempersingkat waktu produksi menjadi 5 jam 31 menit. Masukan yang paling penting dalam penelitian Aditya (2015) adalah perlunya penelitian lebih mendalam tentang karakteristik dari SRCGF sebagai bahan mentah yang paling baik dalam pembuatan *mold* souvenir logam sehingga akan diperoleh hasil cetakan yang sempurna.

Perkembangan teknologi dalam dunia industri sudah sangat pesat. Untuk itu teknologi tidak bisa lepas dari sebuah pengembangan produk. Teknologi yang digunakan dalam pengembangan suatu produk adalah CAD/CAM. Menurut Ningsih (2005) CAD merupakan satu bentuk otomatisasi yang membantu perancang untuk memperbaiki gambar, spesifikasi, dan elemen – elemen yang berhubungan dengan perancangan yang menggunakan efek grafis khusus dan perhitungan program – program komputer. Dengan adanya CAD, maka akan sangat membantu dalam pembuatan desain produk. Selain kesalahan yang dibuat dapat diminimalkan, waktu dalam pembuatan desain akan menjadi lebih cepat dibandingkan dengan cara manual.

Penggunaan CAD tidak bisa lepas dari CAM. Menurut Hong (2000) *Computer Aided Manufacturing* atau yang dikenal dengan CAM merupakan penggunaan efektif dari teknologi komputer dalam perencanaan, manajemen, dan pengendalian fungsi manufaktur. Hong (2000) menjelaskan bahwa CAM adalah bagian bisnis dari komputer grafis, dimana semua pekerjaan fisik dilakukan di lantai produksi untuk memproduksi bagian yang nyata dibantu dengan menggunakan CAD.

Selain CAD/CAM terdapat istilah CAE yang sering digunakan dalam rekayasa teknologi dalam arti yang lebih luas dari sekedar teknik analisis. Menurut Ghodake dan Patil dalam penelitiannya yang berjudul “*Piston Design and Analysis by CAE Tools*”, CAE dapat digunakan untuk melakukan desain produk

dan mensimulasikan desain yang dibuat untuk menganalisis *residual stress*, *structural response*, kelelahan sebelum dan setelah proses (*pre processing and post processing fatigue*), serta efek yang sama pada komponen mesin. CAE dapat digunakan *engineers* untuk memberikan tekanan pada komponen dengan kondisi yang ekstrim dan mensimulasikan respon dari komponen tersebut atau melakukan hal yang tidak mungkin dilakukan karena keterbatasan keselamatan dan pertimbangan biaya yang akan dikeluarkan.

Penelitian mengenai metode FEA telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Metode ini merupakan cara yang efektif untuk mencari tegangan dan regangan pada sebuah benda yang sulit diselesaikan secara analitik. Sebuah objek akan dibagi menjadi kepingan - kepingan sederhana yang nantinya akan dilakukan analisis perhitungan untuk mengetahui permasalahan yang terjadi pada obyek tersebut.

Metode FEA diperkenalkan pertama kali oleh Turner et al, yang merupakan teknik komputasi yang kuat untuk mencari solusi yang kompleks dari kondisi di luar perkiraan (Hasan et al, 2013). Metode ini diakui sebagai prosedur pendekatan numerik secara umum untuk semua masalah fisik dari sebuah objek yang dapat dimodelkan dengan deskripsi persamaan diferensial. Hal ini melibatkan serangkaian prosedur komputasi untuk menghitung tegangan dan regangan pada setiap elemen (Gallagher, 1975).

Penelitian mengenai metode elemen hingga pada bahan karet sudah sangat banyak. Sebagai contoh adalah Fukahori dkk (2008), mengenai *Criteria for crack initiation during rubber abrasion*. Menurut Fukahori dkk (2008), karet yang mengalami abrasi akan membentuk karakteristik pada permukaan atau akan membentuk sebuah pola. Pola yang terbentuk disebut pola abrasi yang dapat diamati secara luas pada permukaan produk karet seperti ban, *conveyor belt*, gulungan untuk percetakan, dan sepatu.

Shergold dkk (2005) melakukan penelitian mengenai *The uniaxial stress versus strain response of pig skin and silicone rubber at low and high strain rates*. Shergold dkk (2005) melakukan uji regangan terhadap kulit babi dan *silicone rubber* Sil8800 pada tegangan tinggi dan tegangan rendah. Percobaan yang dilakukan menunjukkan reaksi kulit babi yang menegang saat diberi regangan dan lebih cepat mengeras dibandingkan *silicone rubber* Sil8800.

Yang dkk (2014) meneliti *A simulation study on the effect of spring-shaped fillers on the viscoelasticity of rubber nanocomposite*. Latar belakang penelitian yang

dilakukan Yang dkk (2014) adalah nanocomposite material karet memiliki sifat yang unik seperti elastisitas yang tinggi dan *viscoelasticity*. Oleh karena itu Yang dkk (2014) menggunakan metode elemen hingga untuk menganalisis efek modulus elastis dan volume isi pada nanocomposite karet. Hasil dari simulasi yang dilakukan menunjukkan bahwa modulus elastisitas yang optimal terjadi pada *spring-shaped fillers* untuk meminimalisir faktor kerugian.

Ilmu mekanika kontak merupakan ilmu yang membahas mekanisme kontak antara dua buah benda yang saling bersinggungan. Penelitian yang dilakukan Fitriawan (2011) adalah menganalisis tentang kontak antara lingkaran dengan sebuah permukaan yang kasar. Sifat material yang digunakan pada pemodelan ini adalah elastis-plastis dengan *strain hardening* dan mengambil suatu kasus kontak statis antara *rigid indenter vs rough surface*. *Displacement* (ω) yang dikenakan pada *rigid indenter* yang kontak dengan *rough surface* yang disertai dengan koefisien gesek dan penekanan *rough surface* yang berulang-ulang merupakan parameter analisis dalam menentukan hasil simulasi. *Software* yang digunakan adalah Abaqus 6.10 dengan metode elemen hingga. *Present* model diamati untuk membandingkan apakah semua fenomena yang terjadi sudah sesuai dengan hasil simulasi yang dilakukan.

Wicahyo (2014) pada tugas akhir meneliti Pengaruh *Wedge Angel* Pada *Blade Indenter* dalam pengujian tekanan material *Hyperelastic* menggunakan metode elemen hingga. Menurut Wicahyo (2014) variasi sudut *blade indenter* dapat menunjukkan hasil distribusi tegangan maksimal, respon gaya ketika terjadi penekanan oleh *indenter*, kontur dari material *hyperelastic* dan pengaruh beban terhadap kedalaman indentasi yang dihasilkan.

2.2. Penelitian Sekarang

Tujuan utama dari penelitian ini adalah sebagai langkah awal untuk mengenalkan tentang aplikasi dan implementasi teknologi CAE dalam menyelesaikan kasus-kasus penelitian atau tugas akhir mahasiswa dan dosen di CAD/CAM UAJY khususnya yang berkaitan erat dengan produk artistik dan *orthotic* sehingga dapat menunjukkan ciri khas Prodi TI UAJY di lingkungan industri manufaktur pada umumnya dan lingkungan akademis pada khususnya.

Obyek yang dibahas dalam tulisan ini adalah tentang mengidentifikasi sifat-sifat yang ada pada material SRCGF sebagai bahan dasar untuk membuat *mold* cetakan logam SSS. Berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh

Stefani (2013), Andika (2010), Pradhana (2009), Stephanie (2014), Aditya (2015), dan hasil FGD dengan pihak BBKB DIY dan CV Tin's Art maka material SRCGF dipilih dan ditetapkan sebagai material dasar *mold* cetakan agar memberikan hasil yang optimal. Namun menurut Aditya dan BBKB DIY perlu adanya penelitian lebih mendalam tentang karakteristik dari material ini saat dilakukan proses vulkanisir.

Ketika proses vulkanisir berlangsung SRCGF akan mengalami kontak dengan *cover mold frame vulkanisir* sebagai *flat indenter* yang terbuat dari bahan *steel*. Nilai konstanta dari SRCGF dan *cover mold frame vulkanisir* ditentukan dari penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Shergold dkk (2005).

Untuk mendapatkan fenomena tentang karakteristik material SRCGF selama proses vulkanisir berlangsung diperlukan adanya FEA yang dilakukan oleh penulis untuk menyelesaikan masalah matematis dari sebuah perilaku kompleks yang memberikan output berupa angka atau visualisasi. *Software* CAE Abaqus 6.13. digunakan penulis untuk memodelkan benda yang akan dilakukan analisis dengan metode FEA.

Dalam proses validasi FEA dalam tulisan ini penulis akan membandingkan antara material SRCGF dengan Sil8800 pada penelitian Shergold dkk (2005). Tujuan dari validasi yang dilakukan adalah untuk memastikan bahwa simulasi pengembangan *present* model dengan menggunakan *software* Abaqus 6.13 sudah berada pada langkah yang benar dan dapat dijadikan pembenaran dalam melakukan pemodelan *present* model.

Output akhir yang dihasilkan dari tugas akhir ini berupa tahapan pengoperasian *software* Abaqus 6.13., kurva tegangan – regangan material SRCGF dan Sil8800, kurva verifikasi material SRCGF VS Sil8800, dan kurva pengaruh variasi geometri *flat indenter* di material SRCGF.

2.3. Elastomers

Elastomer merupakan bahan kelas *polimer* yang memiliki elastisitas, yaitu kemampuan untuk membentuk kembali setelah terjadi deformasi. Kata elastomer berasal dari dua istilah, “elasto” yang menunjukkan kemampuan bahan untuk kembali ke bentuk aslinya. Sedangkan “mer” berasal dari kata polimer. Polimer adalah zat yang terdiri dari molekul – molekul dengan massa molekul yang besar dan terdiri dari unit terstruktur, atau monomer, dihubungkan dengan kovalen

kimia obligasi. *Elastomer* terdiri dari rantai polimer dengan berat molekul tinggi yang fleksibel, karena mereka bebas merotasi molekul sepanjang rantai utama. *Elastomers* dapat memanjang sampai beberapa ratus persen bahkan dengan penerapan tekanan yang relatif kecil (Zang, 2004).

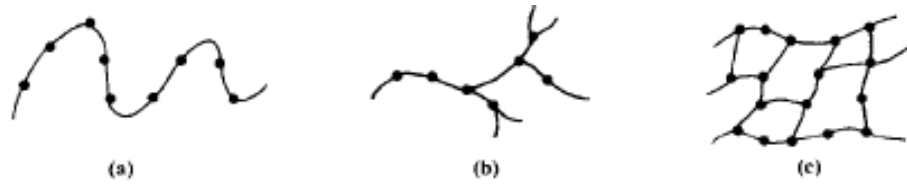
Karet alam (*latex*) adalah bentuk awal dari *elastomers* yang seterusnya digunakan dalam praktek rekayasa dan vulkanisasi. Jenis yang terakhir adalah *elastomers thermosetting*, yaitu jenis *elastomers* yang tidak dapat dicairkan lagi setelah dilakukan pemadatan. Selama Perang Dunia II, penggunaan karet alam dikembangkan untuk aplikasi industri, yang juga merupakan jenis *elastomers thermosetting* (Arayaprane, 2012).

Liang (2007) mengatakan bahwa ada 3 persyaratan polimer untuk menunjukkan perilaku pada elastomers, yaitu :

- a. Temperatur polimer tidak boleh lebih dari batas pengkristalan molekul (*crystalline*).
- b. Polimer harus berada diatas *glass transition temperature*. Pada *glass transition temperature* dapat dianggap sebagai suhu dimana perubahan polimer dari fase kaca ke keadaan karet.
- c. Polimer harus mempunyai ikatan antar molekul yang renggang.

2.4. Fitur Dasar Elastomers

Karet merupakan senyawa *macromolecular* yang terdiri dari banyak *macromolecul*. *Macromolecul* adalah rantai *macromolecular* yang sangat panjang yang dibentuk dari sejumlah unit struktur kimia yang terikat oleh ikatan kovalen. Sebagai contoh, sebuah rantai molekul karet alam terdiri dari sekitar 1000 sampai 5000 unit struktur kimia *isoprena*. Struktur rantai makromolekul tunggal memiliki tiga bentuk dasar (Gambar 2.1), yaitu *linear macromolekul* (rantai lurus), *Branched macromolecule* (rantai cabang) dan *Crosslinked macromolecule* (rantai silang) (Zang, 2004).



(a) Linier macromolecule; (b) Branched macromolecule; (c) Crosslinked macromolecule

**Gambar 2.1. Bentuk Dasar Struktur Macromolecule
(Sumber : Zang, 2004. *Tribology Of Elastomers*)**

Rantai molekul dari linier makromolekul cukup mudah untuk bergerak ke yang lain. Karena itu, makromolekul linear dapat melunak dengan panas, dan mengeras dengan pendinginan. Karakteristik ini dinamakan *thermoplasticity* (Zang, 2004). Adapun makromolekul silang adalah gerakan relatif antara rantai molekul yang sangat dibatasi, sehingga tidak dapat mengalir atau meleleh dengan mudah ketika dipanaskan. Perilaku ini disebut *thermoset*. Dibandingkan dengan logam, karet umumnya memiliki fitur sebagai berikut (Zang, 2004):

- a. Deformasi elastis sangat besar, sedangkan modulus elastisitas sangat kecil. Deformasi elastis karet bisa sampai 1000 %, dan bahkan sebagian besar bahan polimer hanya 1 % atau lebih. Adapun logam biasa deformasi elastisnya lebih kecil dari 1 %. Modulus elastisitas karet sekitar 106 kali lebih kecil dari logam, namun modulus elastisitas logam berlawanan dengan karet.
- b. *Poisson Ratio* dari karet 0,49, lebih besar dibandingkan dengan logam biasa, dekat dengan cairan 0,5. Oleh karena itu selama deformasi volume karet hampir tidak berubah, sedangkan logam tidak demikian.
- c. Deformasi elastis dari karet memiliki sifat relaksasi yang tidak dimiliki oleh logam.
- d. Efek *thermal* lebih jelas selama karet terdeformasi. Efek ini menggambarkan betapa cepatnya peregangan hasil karet dalam melepaskan panas dan mengembalikan ke bentuk semula menyebabkan penyerapan panas, namun logam justru sebaliknya.

Pada tabel 2.1. akan dijelaskan beberapa jenis karet yang sering digunakan.

Tabel 2.1. Jenis Karet yang Sering Digunakan dalam Kehidupan Sehari - hari

<i>Kinds of rubber</i>	<i>Shore-hardness</i>	<i>Tensile strength(MPa)</i>	<i>Maximum service temperature (°C)</i>	<i>Glass transition temperature (°C)</i>
<i>Isobutylene-isoprene rubber</i>	30-100	21	149	-75
<i>Chloroprene rubber</i>	40-95	21	116	-49
<i>Nitrile rubber</i>	20-90	21	149	-22
<i>Silicone rubber</i>	10-85	7	316	-120
<i>Polyurethane</i>	10-100	34	116	-
<i>Natural rubber</i>	30-100	25	70	70
<i>Ethylene propylene rubber</i>	30-90	10	125	-58
<i>Polybutadiene</i>	35-90	10	70	-85

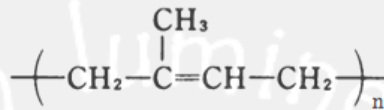
2.5. Jenis-Jenis Elastomers

2.5.1. Natural Rubber (Karet Alam)

Karet alam didapatkan dari getah (latex) tanaman karet yang dihasilkan melalui proses koagulasi dengan bahan kimia, pengeringan, koagulasi listrik, dan proses lainnya adalah *prototype* dari semua *elastomers*. Getah karet yang diekstrak dari kulit pohon *Hevea* adalah partikel karet dalam fase cair. Karena keteraturan struktural yang tinggi, karet alam cenderung mengkristal spontan pada suhu rendah atau ketika diregangkan. Bagian peregangan yang terkena kristalisasi memberikan produk karet alam dengan ketahanan yang luar biasa, fleksibilitas yang tinggi, dan memiliki kekuatan sobek dan tarik yang baik, serta dapat meredam panas dengan baik saat terjadi abrasi. Namun, kelemahan karet alam yaitu memiliki ketahanan lingkungan yang kurang baik, seperti oksidasi dan ozon, demikian juga untuk ketahanan terhadap bahan kimia, termasuk bensin, minyak

tanah, cairan hidrolik, minyak pelumas, pelumas sintetis, dan pelarut (Arayapranee, 2012).

Penggunaan karet alam terbesar terdapat pada produksi ban. Lebih dari 70 % pembuatannya adalah pada penggunaan ban. Sisanya diaplikasikan pada berbagai macam produk seperti ikat pinggang, selang, gasket, alas kaki, dan perangkat anti *vibration* seperti mesin tunggangan (Arayapranee, 2012).

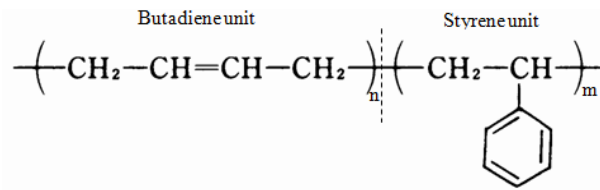


Gambar 2.2. Struktur Ikatan Kimia *Natural Rubber*
(Sumber : Liang, 2007. *Investigating the Mechanism of Elastomers Abrasion*)

2.5.2. Styrene-butadiene Rubber (SBR)

Arayapranee (2012) menjelaskan SBR adalah karet sintetis yang berasal dari minyak bumi, merupakan *co-polymer* dari *Styrena* dan *Butadyena*. Ini pertama kali dibuat di Jerman pada tahun 1930-an sebagai pengganti sintetis untuk karet alam. SBR mempunyai kemampuan yang berbeda dari yang lain, SBR tidak terjadi kristalisasi pada regangan besar.

SBR umumnya memiliki berat molekul yang rata-rata lebih tinggi dan ikatan antar molekul yang lebih padat. Sehingga SBR memiliki ketahanan abrasi yang lebih baik dan ketahanan aus serta kekuatan tarik yang lebih besar. Pengolahan senyawa SBR secara umum mirip dengan pengolahan *Natural Rubber* dalam prosedur dan aditif yang digunakan. SBR memiliki tingkat abrasi yang lebih baik, *crack* inisiasi, dan lebih tahan panas dibanding *Natural Rubber*. Aplikasi utama SBR padat adalah di dunia otomotif dan industri ban, penggunaannya terhitung ada sekitar 70 persen. Oleh karena itu, SBR berhubungan erat dengan industri ban dan penggunaan lainnya seperti industri jaket, kabel, *belting*, selang, dan barang-barang mekanik (Arayapranee, 2012).



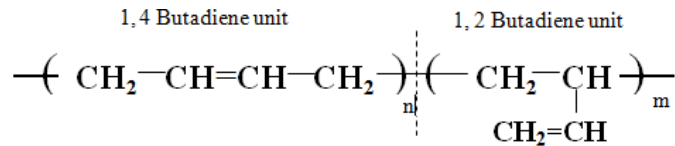
Gambar 2.3. Struktur Ikatan Kimia *Styrene-butadiene Rubber*
 (Sumber : Liang, 2007. *Investigating the Mechanism of Elastomers Abrasion*)

2.5.3. *Poly-Butadiene Rubber (BR)*

Karet *poly-butadiene* (BR) pada awalnya dibuat oleh polimerisasi emulsi, biasanya dengan hasil yang buruk. BR sulit dalam pengolahan dan tidak mengekstrusi dengan baik. Karet ini menjadi sukses secara komersial hanya setelah dibuat oleh polimerisasi larutan menggunakan *stereospesifik* katalis Ziegler-Natta. Struktur ini mengeras pada temperatur yang lebih rendah (dengan T_g -100 °C) dari karet alam dan karet paling komersial lainnya. Hal ini memberikan fleksibilitas suhu rendah yang lebih baik dan ketahanan yang lebih tinggi pada suhu kamar daripada kebanyakan karet. BR ini juga diketahui memiliki ketahanan abrasi yang tangguh dan toleransi yang besar untuk tingkat *extender oil* yang tinggi dan *carbon black*.

Berbeda dengan karet sintetis, BR secara luas digunakan dalam senyawa pada permukaan ban untuk meningkatkan ketahanan abrasinya. BR memiliki ketahanan abrasi yang lebih tinggi dibanding jenis *elastomers* lainnya dan biasanya digunakan untuk campuran.

Penggunaan utama *poly-butadiene* adalah dalam ban dengan lebih dari 70 % dari polimer yang dihasilkan digunakan oleh industri ban, terutama dalam campuran dengan SBR atau karet alam guna meningkatkan meningkatkan histeresis (ketahanan terhadap penumpukan panas), ketahanan abrasi, dan memotong resistensi pertumbuhan tapak ban. BR memiliki ketahanan abrasi yang sangat baik, memiliki hambatan gelinding yang rendah namun memiliki traksi basah yang rendah. *Polibutadiene* juga digunakan untuk meningkatkan daya tahan dan abrasi serta *flex* resistensi *crack* di ban *chaffer*, dinding samping dan karkas, serta sebagai campuran karet untuk *belting*. Ada juga pasar yang cukup besar dalam penggunaan BR seperti pada bagian dalam bentuk padat inti bola golf (Arayaprane, 2012).



Gambar 2.4. Struktur Ikatan Kimia *Poly-butadiene Rubber*
 (Sumber : Liang, 2007. *Investigating the Mechanism of Elastomers Abrasion*)

2.6. Vulkanisasi

Menurut Arayaprane (2012) vulkanisasi merupakan pemberian bahan kimia pada karet untuk mendapatkan karakteristik *elastomers* yang diinginkan dengan penambahan sulfur, peroksida, atau *metallic oxides*. Dari proses vulkanisasi maka akan didapatkan *elastomers* yang tidak lengket, lebih tahan aus, dan lebih ulet, serta memiliki ketahanan terhadap lingkungan yang lebih baik. Formulasi senyawa yang berbeda dapat menghasilkan berbagai sifat.

2.7. Material *Hyperelastic*

Material *elastic* adalah material yang akan kembali ke bentuk semula ketika beban yang diberikan dilepas. Disatu sisi, deformasi plastis tidak akan kembali ke bentuk semula walaupun bebannya sudah dilepas, karena adanya deformasi yang permanen. Material *engineering* seperti metal diklasifikasikan sebagai *linear elastic solid*, sedangkan material *rubber* diklasifikasikan sebagai *nonlinear elastic solid*. Perbedaannya adalah perilaku *stress-strain* seperti pada Gambar 2.6. kurva ini menunjukkan hubungan antara *stress* dan *strain* untuk pembebanan *uniaxial*. Jarak linier *elastic* ditunjukkan pada kurva warna biru seperti pada Gambar 2.5. Hampir semua logam memiliki kurva *stress* dan *strain* linier. Perilaku dari material karet ditunjukkan pada kurva warna merah. Gambar 2.5. menunjukkan bahwa material *hyperelastic* hubungan *stress* dan *strain*-nya berbeda dengan logam, hubungan *stress* dan *strain*-nya tidak linier. Dalam kasus ini, kurva selama *loading* dan *unloading* mengikuti alur yang sama dengan arah yang berkebalikan, tegangan adalah fungsi yang khusus terhadap regangan atau deformasi (Garcia dkk, 2005).

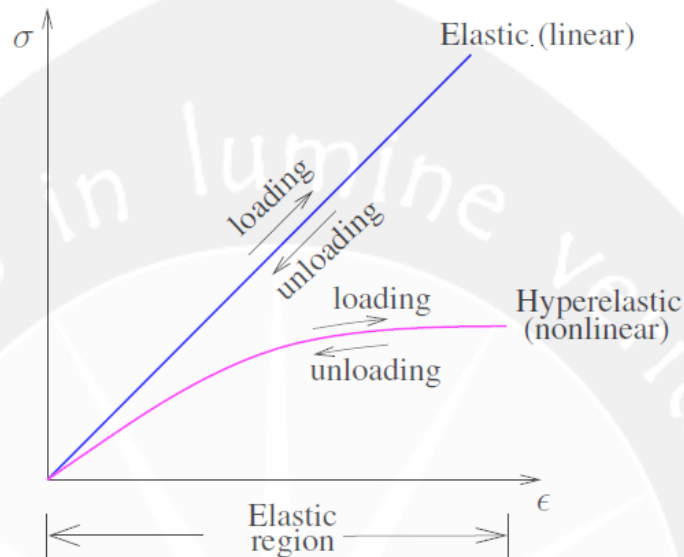
2.7.1. Hubungan *Linear Elastic*

Hubungan antara tegangan dan deformasi dapat ditunjukkan pada persamaan *constitutive*. Pada umumnya untuk menunjukkan hubungan linier antara *stress* σ

dan *strain* ϵ ditunjukkan dalam hukum hooke (*linear proportional relationship* oleh Robert Hooke) (Garcia dkk, 2005)

$$\sigma = C \epsilon \quad (2.1)$$

Dimana σ adalah komponen dari Cauchy *stres*, ϵ adalah komponen dari *strain* dan C disebut *elastic constants*.



Gambar 2.5. Grafik Tegangan-Regangan *Elastic* dan *Hyperelastic*
(Sumber : Garcia dkk, 2005. *Hyperelastic Material Modeling*)

Secara ringkas, perilaku dari material elastis dapat dikarakterisasikan menjadi tiga sifat yang saling berhubungan (Garcia dkk, 2005):

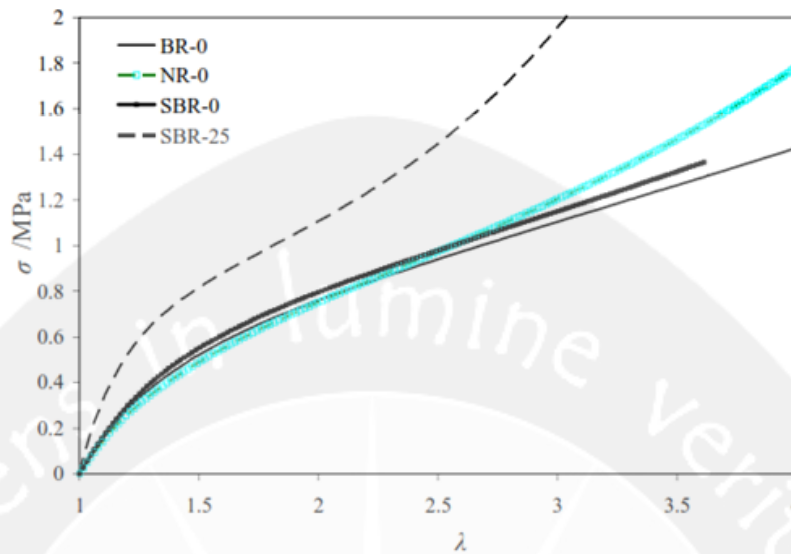
1. Koefisien material C adalah simetri.
2. Ada kondisi simetri tambahan untuk tensor C .
3. *Stress* dan *strain tensor* harus sama.

2.7.2. *Nonlinear Elasticity*

Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai bahan untuk *nonlinier elastic* pada bahan deformasi besar yang lebih umum dikenal sebagai *hyperelastic*. Diantara serat elastis, ada berbagai macam polimer (karet) yang dapat dimodelkan dengan persamaan konstitutif *hyperelastic* antara serat elastis. Teori elastisitas *nonlinier* dimaksudkan untuk menjelaskan fenomena ini. Fitur utama dari bahan elastis *nonlinier* adalah:

1. Analisis deformasi besar adalah *nonlinear*.
2. Tidak memiliki deformasi tetap.
3. Tidak ada kesebandingan antara tegangan dan regangan.

4. *Elastic rigid C*, bukan matriks koefisien konstan. Sebaliknya, jumlah hubungan tegangan-regangan berasal dari fungsi energi regangan W Garcia dkk (2005).



Gambar 2.6. Grafik Hubungan *Engineering Stress* dengan *Extension Ratio* untuk Beberapa Jenis *Elastomers*

(Sumber : Liang, 2007. *Investigating the Mechanism of Elastomers Abrasion*)

2.7.2. Basic Concepts

2.7.3.1. Stretch Ratio

Gambar 2.7. menunjukkan panjang awal L_0 dan panjang akhir L , dengan gaya F . Kemudian, strain ϵ_E dapat dinyatakan dengan:

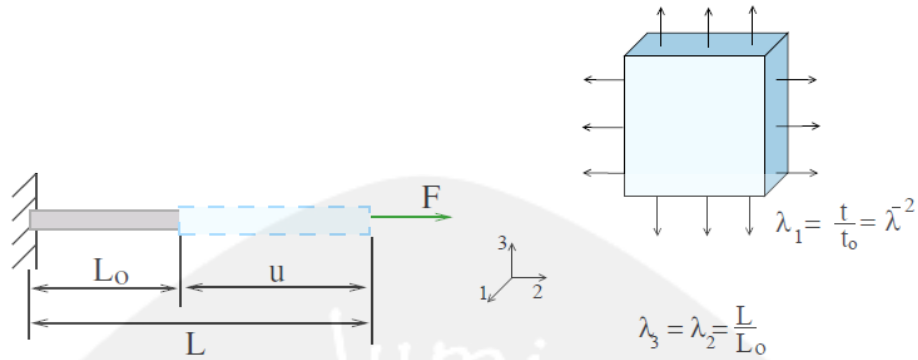
$$\epsilon_E = \frac{L-L_0}{L_0} = \frac{u}{L_0} \quad (2.1)$$

dimana u adalah *displacement*.

Stretch ratio didefinisikan sebagai rasio dari *deformed length* L dibagi dengan panjang awal L_0 .

$$\lambda = \frac{L}{L_0} = \frac{L_0+u}{L_0} = 1 + \epsilon_E \quad (2.2)$$

Ini adalah contoh dari rasio peregangan seperti yang didefinisikan untuk ketegangan *uniaxial* spesimen karet. Terdapat tiga rasio peregangan utama λ_1 , λ_2 , dan λ_3 yang akan memberikan ukuran deformasi. Gambar 2.11. menunjukkan lembar kotak karet yang tipis pada tegangan *biaxial*. Pokok bidang rasio λ_1 dan λ_2 adalah karakteristik pada bidang deformasi (Garcia dkk, 2005).



(a) Stretching of rubber rod

(b) Square rubber sheet in biaxial tension

Gambar 2.7. Principal Stretch Ratio

2.7.3.2. Principal Invariants

Strain invariants adalah ukuran regangan yang independen dari sistem koordinat yang digunakan untuk mengukur *strain*. Fungsi energi regangan untuk bahan *hyperelastic* dapat ditulis sebagai fungsi dari *invariants* utama I_1 , I_2 , I_3 oleh Cauchy-Green deformation C .

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (2.3)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (2.4)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (2.5)$$

dimana λ_1 , λ_2 , dan λ_3 adalah rasio regangan (Garcia dkk, 2005).

2.7.3.3. Volume Ratio

Volume ratio J adalah perbandingan *deformed volume* dengan *undeformed volume* material (Garcia dkk, 2005).

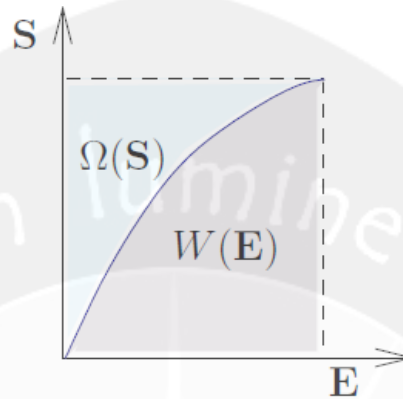
$$J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = \frac{V}{V_0} \quad (2.7)$$

2.7.3.4. Fungsi Energi Regangan $W(E)$

Cauchy stress tensor σ tidak digunakan untuk menganalisis bahan yang mengalami deformasi besar karena daerah dalam bentuk terdeformasi umumnya tidak diketahui. Dengan demikian, perlu untuk menentukan ukuran stress yang dapat kita gunakan dalam konfigurasi referensi. Kita harus menurunkan persamaan konstitutif bahan *hyperelastic* dalam 2 hal yaitu, Piola Kirchhoff stress S dan Green-Lagrange strain E . Sebuah bahan elastis dapat diwakili oleh fungsi

W. Energi regangan untuk bahan *hyperelastic* ini menggunakan bentuk persamaan sebagai berikut:

$$S = \frac{\partial W}{\partial E}, E = \frac{\partial \Omega}{\partial S} \quad (2.8)$$



Gambar 2.8. Kurva Stress-Strain

(Sumber : Garcia dkk, 2005. *Hyperelastic Material Modeling*)

Kurva tegangan-regangan material *hyperelastic* ditunjukkan pada Gambar 2.5. Dapat dilihat bahwa kurva tersebut memperlihatkan area fungsi energi regangan $W(E)$ (Garcia dkk, 2005).

2.8. Karakteristik *Hyperelastic*

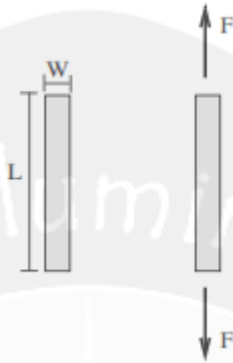
Pengujian dilakukan untuk mendapatkan sifat material dan memprediksi desain yang nyata. Kombinasi pengujian tersebut akan didapatkan koefisien model kemudian data ini harus dihitung menggunakan temperatur yang sama dan tegangan rata-rata. Properti material dibutuhkan untuk menghitung koefisien *defiatoric* yang dapat ditentukan menggunakan *test data* (Garcia dkk, 2005):

- a. *Uniaxial tension test*
- b. *Shear test (planar tension)*
- c. *Equilibrium tension test*
- d. *Volumetric test*

2.8.1. *Uniaxial Tension Test*

Pengujian tegangan *uniaxial* menghitung sifat material di bawah *plane stress*, persyaratan utama adalah untuk mendapatkan bagian *pure tensile strain*, spesimen harus bertambah panjang searah dengan gaya tariknya, dibandingkan dengan lebar dan tebal dari dimensi spesimen. Tidak ada persyaratan ukuran

standarnya. Tetapi, dengan FEA pada geometri spesimennya dapat dihitung bahwa spesimen itu memerlukan panjang paling sedikit 10 kali dibanding lebar/tebalnya.



Gambar 2.9. Uniaxial Test

(Sumber : Garcia dkk, 2005. *Hyperelastic Material Modeling*)

Tensile strain biasanya ditentukan dari gerakan relatif dari dua pencekam dipisahkan oleh jarak yang diketahui.

$$\lambda_1 = \frac{L}{L_0} \quad \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_1^{-\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

Area regangan *engineering stress* dihitung dari besar nilai gaya dari pembebanan dan ketika beban diangkat menggunakan persamaan:

$$\sigma_1 = \sigma = \frac{F}{A_0}, \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (2.10)$$

Dimana σ adalah tegangan, F gaya yang diterapkan, dan A_0 adalah luas dari specimen Garcia dkk (2005).

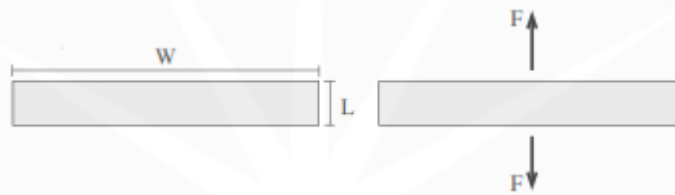
2.8.2. Planar Shear Stress

Planar test mempunyai tegangan yang sama seperti pada *pure shear test*, aspek yang sangat signifikan dari spesimen ini adalah lebih pendek pada arah tariknya dibanding pelebarannya.

Tabel 2.2. Standar Spesimen untuk *Tensile Testing*

Standard	Type	I3	I2	I1	b2	b1	h	L0	L
Thermoplastic and thermosetting plastics									
ISO527-2	1A	≥ 150	104 - 113	80 ± 2	20 ± 0.2	10 ± 0.2	4 ± 0.2	50 ± 0.5	115 ± 1
ISO527-2	1B	≥ 150	106 - 120	60 ± 2	20 ± 0.2	10 ± 0.2	4 ± 0.2	50 ± 0.5	I2 + 5
ISO527-2	1BA	≥ 75	58 ± 2	30 ± 0.5	10 ± 0.5	5 ± 0.5	≥ 2	25 ± 0.5	58 ± 2
ISO527-2	1BA	≥ 75	23 ± 2	12 ± 0.5	4 ± 0.2	2 ± 0.2	≥ 2	10 ± 0.2	23 ± 2
Rubbers and Elastomers									
ISO37	1	≥ 115	-	33 ± 2	25 ± 1	6 ± 0.4	2 ± 0.2	25 ± 0.5	≥ 115
ISO37	2	≥ 75	-	25 ± 1	12.5 ± 1	4 ± 0.1	2 ± 0.2	20 ± 0.5	≥ 75
ISO37	3	≥ 50	-	16 ± 1	8.5 ± 1	4 ± 0.1	2 ± 0.2	10 ± 0.5	≥ 50
ISO37	4	≥ 35	-	12 ± 0.5	6 ± 0.5	2 ± 0.1	1 ± 0.1	10 ± 0.5	≥ 35
ASTM412	C	≥ 115	-	33 ± 2	25 ± 1	6 ± 0.05	1, 3...3, 3	25 ± 0.25	≥ 115
ASTM412	A	≥ 140	-	59 ± 2	25 ± 1	12 ± 0.05	1, 3...3, 3	50 ± 0.5	≥ 140
Thin sheetings and films									
ISO527-3	2	≥ 150	-	-	-	10	≤ 1	50 ± 0.5	100 ± 0.5

Dimana L menunjukkan panjang, dan w adalah lebarnya, Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10.



Gambar 2.10. Planar Shear Test

(Sumber : Garcia dkk, 2005. *Hyperelastic Material Modeling*)

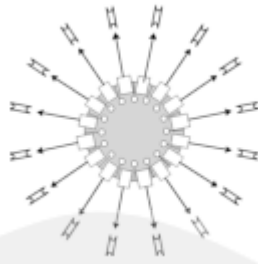
$$\lambda_1 = \lambda = \frac{L}{L_0} \quad \lambda_2 = \lambda^{-1} \quad \lambda_3 = 1 \quad (2.11)$$

Dimana λ adalah perubahan panjang yang searah dengan bebannya. *Stress state* (area tegangan) *planar stress* σ dihitung dengan mengukur gaya F dan lebar spesimen w dan ketebalannya t Garcia dkk (2005).

$$\sigma_1 = \sigma \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (2.12)$$

2.8.3. *Biaxial Tension Test*

Equibiaxial tension test membutuhkan area tegangan yang sebanding dengan tegangan tariknya sepanjang arah dua *orthogonal*. Persamaan *biaxial strain state* akan didapatkan dengan memberikan tegangan tarik secara radial disekelilingnya berbentuk *circular disk* seperti pada gambar 2.11.



Gambar 2.11. Spesimen *Biaxial*

(Sumber : Garcia dkk, 2005. *Hyperelastic Material Modeling*)

Strain state

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda = \frac{L}{L_0} \quad \lambda_3 = \lambda^{-2} \quad (2.13)$$

Dimana λ adalah perubahan panjang yang tegak lurus dengan arah pembebanannya.

Stress state nilai *equibiaxial stress* berisi diameter dalam yang dihitung menggunakan:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (2.14)$$

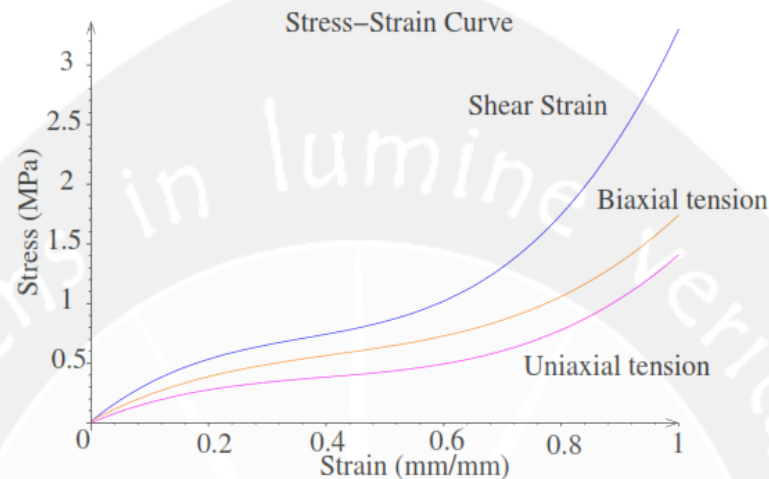
Dimana σ tegangan, P adalah penjumlahan gaya radialnya, $A_0 = \pi D t_0$ adalah awal area spesimen, D adalah diameter awal antara *punch holes*, t_0 adalah ketebalan awal.

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma \quad \sigma_3 = 0 \quad (2.15)$$

Keberhasilan desain dan permodelan material *hyperelastic*, tergantung pada pemilihan yang tepat pada fungsi energi regangannya, dan kekuatan perhitungan koefisien pada fungsinya. Tahap berikutnya mendeskripsikan prosedur untuk mencari standar minimum tes yang diperlukan untuk mendapatkan karakteristik yang bagus pada material *hyperelastic*.

Tipe eksperimen untuk menghitung konstanta dari *hyperelastic model* adalah *uniaxial tension*, *uniaxial compression*, *planar shear*, *biaxial tension*, and *volumetric test*. Umumnya, tidak semua persyaratan uji eksperimen tersedia untuk mengkarakteristikan material *hyperelastic*. Hanya satu test *uniaxial tension*, yang tersedia. Tingginya biaya peralatan membatasi pelaksanaan tes tersebut seperti *Shear* dan *biaxial tension*. Misalnya, tes *biaxial* membutuhkan

mesin uji yang mahal atau perlengkapan khusus. Bagian berikutnya membahas perhitungan tegangan mekanis dalam tegangan, juga metodologi telah dikembangkan untuk menentukan jumlah minimum tes yang diperlukan untuk ciri struktur *hyperelastic*.



Gambar 2.12. Kurva Eksperimental Tegangan-Regangan untuk *Elastomers*
(Sumber : Garcia dkk, 2005. *Hyperelastic Material Modeling*)

2.9. Kontak Hyperelastic

Pada penelitian mengenai kontak elastis – plastis pada material *viscoelastic* belum ada rumus empiris (metode analitik) yang dapat diaplikasikan. Penelitian terhadap *present* model *viscoelastic* digunakan analisis numerik (FEA). Tujuan dari *present* model di sini adalah suatu bentuk yang dijadikan obyek dalam penelitian, memiliki kondisi batas serta dibuat atau dimodelkan ke dalam FEA.

Agar hasil simulasi benar, maka di lakukan perbandingan perbandingan dengan model-model lain terlebih dahulu. Tujuan melakukan perbandingan adalah untuk memastikan bahwa simulasi pengembangan *present* model dengan menggunakan *software* Abaqus 6.13. sudah berada pada langkah yang benar dan dapat dijadikan pembenaran dalam melakukan pemodelan *present* model.