

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1. Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai analisis elemen hingga (*Finite Element Analisis*) 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 objek tersebut.

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.

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 Jobaer dkk (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).

Jason Tak-Man Cheung dan Ming Zhang (2006) dalam jurnal penelitiannya yang membahas tentang *Finite Element Modeling of the Human Foot and Footwear*. Dalam penelitiannya ini Cheung dan Ming melakukan pembentukan model FE terhadap kaki manusia yang digunakan untuk mengukur interaksi antara biomekanik tulang, ligament, interaksi antara planar kaki dan perbedaan kondisi dalam pembebanan. Kemampuan model untuk mengukur efek biomekanis dari berbagai faktor geometris dan struktur material yang berbeda dari kaki untuk memprediksi hasil pada pembedahan kaki yang berbeda. Menurut Cheung dan Ming penggunaan metode elemen hingga dapat menjadi tambahan untuk pendekatan eksperimental sehingga dapat memprediksi distribusi beban antara

kaki yang mungkin memiliki perbedaan, dan menawarkan informasi tambahan seperti *internal stres* dan ketegangan dari kompleks pergelangan kaki.

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

Penelitian tentang element hingga juga dilakukan oleh peneliti lainnya, antara lain: Hong Tiang dan Nannaji Saka (1991) tentang *Finite element analysis of an elastic-plastic two layer half-space*, Yanping Cao dkk (2009) tentang *The use of flat punch indentation to determine the viscoelastic properties in the time and frequency domains of a soft layer bonded to a rigid substrate*.

## **2.2. Penelitian Sekarang**

Tujuan dari penulisan tugas akhir ini untuk mengenalkan tentang manfaat penerapan teknologi CAE pada Prodi TI UAJY khususnya pada kasus-kasus penelitian tentang pembuatan model produk yang selama ini masih menitik beratkan pada design produk, tanpa memperhatikan karakteristik dari bahan yang digunakan.

Dalam penulisan tugas akhir ini kasus yang akan dibahas oleh penulis tentang mengidentifikasi karakteristik dari material EVA Rubber sebagai bahan pembuatan insole sepatu orthotic dengan menggunakan mesin *CNC Milling* yang diharapkan dapat memberikan hasil yang optimal dan presisi seperti model yang telah dibuat.

Ketika proses permesian berlangsung alat potong yang digunakan untuk membentuk insole sepatu orthotic adalah Ballnose HSS. Nilai konstanta yang digunakan oleh penulis untuk memberikan karakteristik pada material berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan oleh Cheung dan Ming Zhang (2006).

*Software* CAE Abaqus 6.13. digunakan penulis untuk menerapkan metode FEA pada pemodelan benda uji sehingga dapat menyelesaikan masalah matematis dari sebuah perilaku kompleks yang akan memberikan output berupa angka atau

visualisasi model yang nantinya diharapkan dapat memberikan penjelasan tentang karakteristik pada material EVA Rubber.

Dalam kasus ini penulis akan membandingkan antara material EVA rubber dengan NORA SLW yang didapat dari penelitian Cheung dan Ming Zhang (2006). Tujuan dari perbandingan dua material ini supaya dapat dijadikan validasi terhadap model yang akan diteliti oleh penulis sehingga pengembangan *present* model yang dilakukan dapat dikatakan telah berada pada langkah yang benar.

Hasil akhir dari penulisan tugas akhir ini adalah berupa tahapan pengoperasian *software* Abaqus 6.13 dalam proses pembuatan model benda uji, juga menghasilkan kurva tegangan – regangan material EVA rubber dan NORA SLW, kurva verifikasi material EVA rubber dan NORA SLW, dan kurva pengaruh variasi geometri *flat indenter* di EVA rubber dengan diameter Ballnose HSS 4mm dan 6mm.

### **2.3. Teori Dasar Analisis Elemen Hingga (FEA)**

Analisis elemen hingga (FEA) adalah metode komputerisasi untuk memprediksi bagaimana sebuah produk bereaksi terhadap kekuatan di dunia nyata mengenai getaran, panas, aliran fluida, dan efek fisik lainnya. Analisis elemen hingga menunjukkan apakah suatu produk akan pecah, aus, bekerja sesuai dengan fungsinya, dan untuk memprediksi apa yang akan terjadi pada saat produk digunakan. Persamaan matematika membantu memprediksi perilaku masing-masing elemen.

### **2.4. Computer Aided Engineering - CAE**

CAE merupakan suatu teknologi yang menggunakan sistem komputer untuk menganalisis fungsi dari produk desain CAD, yang memungkinkan desainer untuk mensimulasikan dan mempelajari bagaimana produk tersebut akan berperilaku sehingga desainnya dapat disempurnakan dan nantinya hasil dari simulasi tersebut dapat divalidasi sehingga menghasilkan hasil design yang optimal . Berikut adalah pembahasan mengenai teknologi CAE yang dipakai pada penelitian ini.

### **2.5. Elastomers**

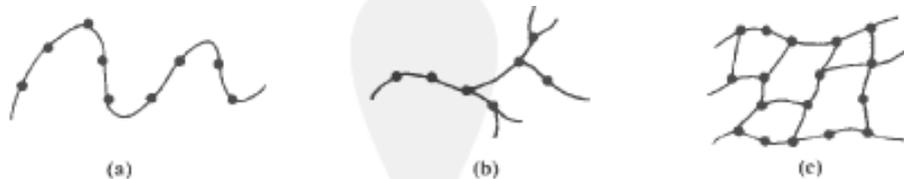
*Elastomers* biasanya digunakan sebagai istilah umum untuk kelompok polimer dengan beberapa karakter umum, seperti elastisitas tinggi, *viscoelasticity* dan

*glass transition temperature* yang jauh dibawah suhu ruangan. Secara umum, karet bisa disebut *elastomers* karena memiliki elastisitas yang tinggi. *Rubber* atau *Elastomers* adalah jenis *polimer* yang ketika mengalami regangan yang besar dapat kembali dengan cepat untuk mendekati bentuk aslinya. Kata-kata '*elastomers*' dan '*rubber*' sering digunakan untuk arti yang sama. *Elastomers* 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). Menurut Liang (2007) ada tiga persyaratan polimer untuk menunjukkan perilaku elastomers :

- 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.

## 2.6. Fitur Dasar Elastomers

Karet merupakan senyawa *macromolecular* yang terdiri dari banyak *macromolecul*. Setiap *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 secara berurutan dapat dilihat pada gambar (Gambar 2.1), yaitu *linear macromolekul* (rantai lurus), *Branched macromolecul* (rantai cabang) dan *Crosslinked macromolecul* (rantai silang) Zang (2004).



**Gambar 2.1. Bentuk Dasar Struktur *Macromolecul***

(Sumber : Zang, 2004. *Tribology Of Elastomers*)

Rantai molekul dari linier makromolekul cukup mudah untuk bergerak antara satu dengan yang lainnya. 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. Rasio Poisson 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.

Efek *thermal* lebih jelas selama karet terdeformasi. Ini menggambarkan betapa cepatnya peregangan hasil karet dalam melepaskan panas dan mengembalikan kebentuk semula menyebabkan penyerapan panas, namun logam justru sebaliknya.

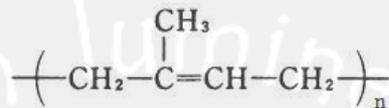
## **2.7. Jenis-Jenis Elastomers**

### **2.7.1. Natural Rubber (Karet Alam)**

Karet alam didapatkan dari getah tanaman karet (latex) yang dihasilkan dari 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 Arayaprane (2012).

Penggunaan karet alam terbesar terdapat pada produksi ban. Lebih dari 70 persen 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 Arayaprane (2012).

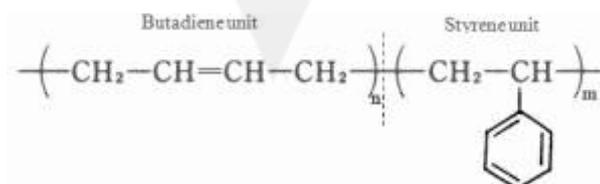


**Gambar 2.2. Struktur ikatan kimia *natural rubber* Liang (2007)**

### 2.7.2. Styrene-butadiene Rubber (SBR)

Arayaprane (2012) menerangkan bahwa 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 Arayaprane (2012).



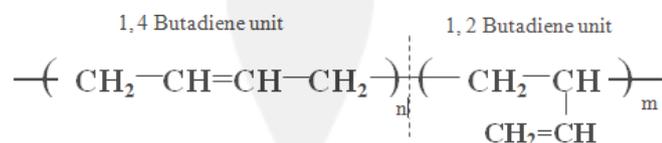
**Gambar 2.3. Struktur ikatan kimia *styrene-butadiene rubber* Liang (2007).**

### 2.7.3. 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 persen 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* diban *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 Araypranee (2012).



Gambar 2.4. Struktur ikatan kimia *poly-butadiene rubber* Liang (2007).

### 2.8. Material Hyperelastic

Material elastic adalah material yang akan kembali pada bentuk semula ketika beban yang diberikan dilepas. Disatu sisi, deformasi plastis tidak akan kembali

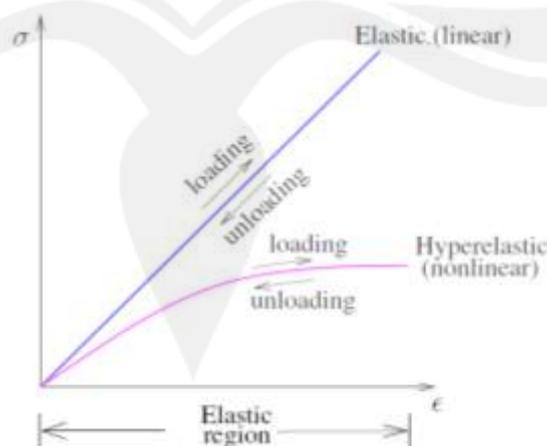
pada bentuk semula walaupun bebannya sudah dilepas, karena adanya deformasi yang permanen. Material *engineering* seperti metal diklasifikasikan sebagai *linear elastic solid*, sedangkan material *rubber* diklasifikasikan sebagai *nonlinear elastic solid*. Perbedaannya adalah perilaku stress-strain yang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

### 2.8.1. Hubungan *Linear Elastic*

Hubungan antara tegangan dan deformasi dapat ditunjukkan pada persamaan *constitutive*. Pada umumnya untuk menunjukkan hubungan linier antara *stress*  $\sigma$  dan *strain*  $\epsilon$  ditunjukkan dalam hukum hooke (*linear proportional relationship* oleh Robert Hooke) (Garcia dkk, 2005)

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

Dimana  $\sigma$  adalah komponen dari Cauchy *stres*,  $\epsilon$  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*)**

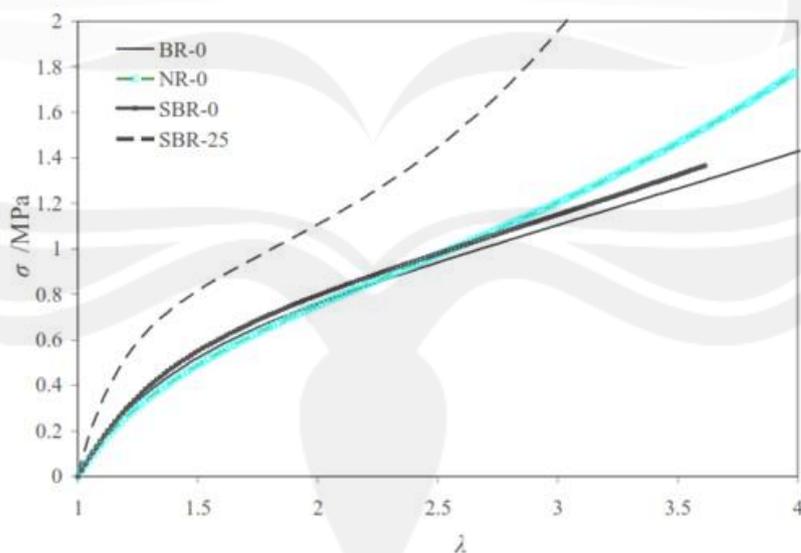
Secara ringkas, perilaku dari material elastis dapat dikarakterisasikan menjadi tiga sifat yang saling berhubungan (Garcia dkk, 2005):

- a. Koefisien material  $\mathbf{C}$  adalah simetri.
- b. Ada kondisi simetri tambahan untuk tensor  $\mathbf{C}$ .
- c. *Stress dan strain tensor* harus sama.

### 2.8.2. *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:

- a. Analisis deformasi besar adalah *nonlinear*.
- b. Tidak memiliki deformasi tetap.
- c. Tidak ada kesebandingan antara tegangan dan regangan.
- d. *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*)

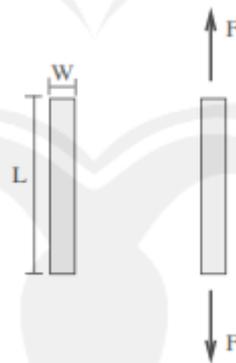
## 2.9 Karakteristik *Hyperelastic*

Karakteristik digunakan untuk memprediksi desain yang lebih nyata, diperlukan pengujian tertentu untuk mendapatkan sifat material. Di mana kombinasi pengujian tersebut didapat koefisien model, 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 :

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

### 2.9.1. *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 2.7. *Uniaxial Test***

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

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

$$\lambda_1 = \frac{L}{L_0} \quad \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_1^{-\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

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

$$\sigma_1 = \sigma = \frac{F}{A_0}, \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (2.3)$$

dimana  $\sigma$  adalah tegangan,  $F$  gaya yang diterapkan, dan  $A_0$  adalah luas dari specimen Garcia dkk (2005).

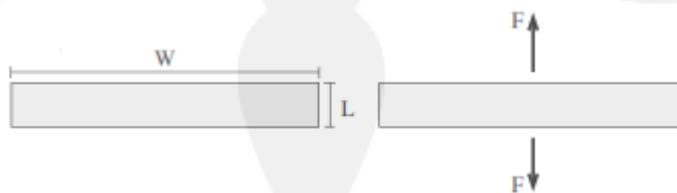
### 2.9.2. Planar Shear Stress

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

**Tabel 2.1. Standar spesimen untuk *tensile testing* Garcia dkk (2005).**

Standard	Type	l3	l2	l1	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	l2 + 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 2.8.



**Gambar 2.8. *Planar shear test* Garcia dkk (2005).**

$$\lambda_1 = \lambda = \frac{L}{L_0} \quad \lambda_2 = \lambda^{-1} \quad \lambda_3 = 1 \quad (2.4)$$

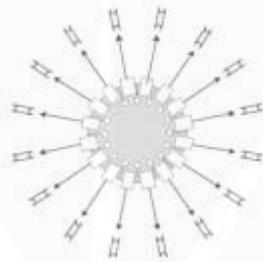
Dimana  $\lambda$  adalah perubahan panjang yang searah dengan bebannya.

*Stress state* (area tegangan) *planar stress*  $\sigma$  dihitung dengan mengukur gaya  $F$  dan lebar spesimen  $w$  dan ketebalannya  $t$  Garcia dkk (2005).

$$\sigma_1 = \sigma \quad \sigma_2 = \sigma \quad \sigma_3 \neq 0 \quad (2.5)$$

### 2.9.3. 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 2.5.



Gambar 2.9. Spesimen *Biaxial*

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

*Strain state*

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda = \frac{L}{L_0} \quad \lambda_3 = \lambda^{-2} \quad (2.6)$$

dimana  $\lambda$  adalah perubahan panjang yang tegak lurus dengan arah pembebanannya.

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

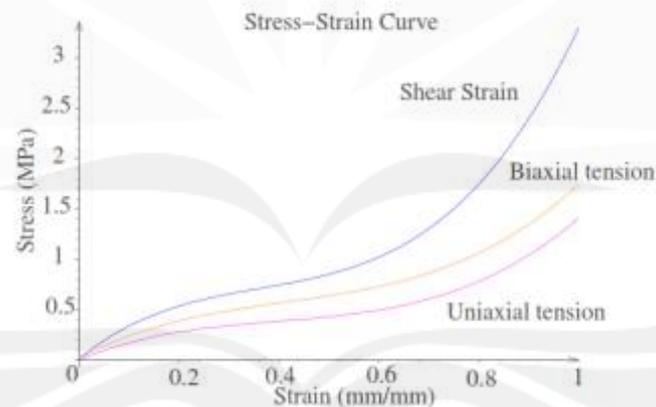
$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (2.7)$$

Dimana  $\sigma$  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.

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma \quad \sigma_3 = 0 \quad (2.8)$$

Keberhasilan desain dan permodelan material *hyperelastic*, teragantung 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 2.10. Kurva Eksperimental Tegangan-Regangan untuk *Elastomers***  
(Sumber : Garcia dkk, 2005. *Hyperelastic Material Modeling*)

## 2.10. Kontak *Hyperelastic*

Dalam penelitian mengenai kontak elastis – plastis pada material *hyperelastic* belum ada rumus empiris (metode analitik) yang dapat diaplikasikan. Pada penelitian yang menggunakan *present* model *hyperelastic* akan dilakukan analisis numerik (FEA). Penggunaan *present* model di sini dimaksudkan dalam suatu bentuk yang dijadikan obyek dalam penelitian, memiliki kondisi batas serta dibuat atau dimodelkan ke dalam FEA.

Supaya hasil simulasi yang telah dilakukan dapat dinyatakan benar, maka dilakukan 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.

