

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Penelitian Terdahulu

Metode *Finite Element Analysis* atau Metode Elemen hingga pertama kali diperkenalkan oleh Turner et al, yang merupakan teknik komputasi yang kuat yang mencari solusi kompleks. Metode ini merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mensimulasikan perilaku dari sebuah material sehingga dapat mengetahui karakteristik dari material tersebut nantinya dan dapat mengurangi jumlah percobaan yang diperlukan (Schreiber, 2015).

Penelitian tentang *Finite Element Analysis* pernah diterapkan oleh Gunawan (2016). Pada penelitian yang dilakukan oleh Gunawan (2016), *Finite Element Analysis* digunakan untuk mensimulasikan perilaku dari material sehingga dapat mengetahui karakteristik dari EVA *rubber*. Gunawan (2016) menerapkan metode ini untuk mengurangi jumlah percobaan proses permesinan pada EVA *rubber* sehingga percobaan akan lebih efektif dan efisien setelah penelitian selesai dilakukan.

Jiayu, dkk (2007) melakukan penelitian mengenai desain *insole* yang baik digunakan oleh wanita dan penelitian ini dilakukan karena adanya penelitian yang menyebut bahwa penggunaan sepatu *high heel* terlalu lama tidak disarankan bagi wanita tetapi pada kenyataannya wanita menggunakan sepatu *high heel* 1 – 8 jam per hari. Sehingga perlu dilakukan penelitian mengenai tekanan yang dihasilkan kaki saat melakukan kontak dengan sepatu *high heel*. Pada penelitian ini, metode *Finite Element Analysis* digunakan untuk menganalisis kontak yang terjadi antara telapak kaki dengan sepatu *high heel*. Dari penelitian ini, peneliti membandingkan tekanan yang dihasilkan oleh kaki yang menggunakan *flat support* dengan *high heel support*.

Penelitian mengenai *Insole Shoe Orthotic* juga pernah dilakukan oleh Wicaksono (2017). Penelitian ini membahas mengenai Re-Innovative Design (RID) yang diaplikasikan pada pembuatan gambar *Insole Shoe Orthotic*. Pada penelitian ini data diambil dari kaki hasil *scanning* kemudian gambar yang sudah ada diubah ke dalam bentuk *solid* kemudian *insole* dibuat menyesuaikan bentuk kaki yang telah di *scan*. Dari hasil penelitian ini, gambar 3D *insole* digunakan sebagai input pada penelitian selanjutnya.

Kemudian untuk penelitian mengenai material *EVA Rubber*, penelitian telah dilakukan oleh Sinaga (2017). Pada penelitian ini, peneliti mencari karakteristik dari material *EVA Rubber* yang berupa nilai kekerasan, nilai tegangan, nilai regangan, nilai modulus elastisitas dan nilai massa jenis dari beberapa jenis *EVA Rubber* yang diteliti. Nantinya parameter yang dihasilkan digunakan sebagai input parameter pada penelitian kali ini.

Tomo (2017) juga melakukan mengenai *Finite Element Analysis* yang digunakan untuk mencari *insole shoe orthotic* yang optimal bagi penderita penyakit kelainan kaki *Flat Feet*. Tomo (2017) melakukan penelitian tersebut dikarenakan masih sangat jarang ditemukan penelitian mengenai kelainan kaki *Flat Feet*. Selain itu penelitian ini dilakukan untuk mencari tahu karakteristik kelainan kaki *Flat Feet* apabila diberi *insole shoe* yang tepat bagi penderita kelainan kaki. Nantinya hasil dari penelitian ini juga akan menghasilkan analisis dalam bentuk kurva.

Permono (2017) melakukan penelitian mengenai *Finite Element Analysis* yang diterapkan dalam perlakuan simulasi kontak antara penderita kelainan kaki diabetes dengan *insole shoe orthotic* yang dibuat khusus untuk menyesuaikan bentuk kelainan kaki penderita diabetes. *Output* yang dihasilkan dari penelitian ini adalah *displacement*, *pressure* dan *von misses stress* yang ditunjukkan melalui kurva.

Chen, dkk (2015) juga melakukan penelitian *Finite Element Analysis* mengenai kontak antara *custom insole shoe* dengan kaki. Parameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah perbedaan antara ketebalan *insole* dan posisi *metatarsal pad*. Setelah melakukan simulasi maka dibandingkan kemudian di analisis mengenai tekanan yang terjadi antara kaki dengan *insole* dan antara kaki dengan *insole* yang menggunakan *metatarsal pad* dengan tiga posisi yang berbeda.

Anggoro, dkk (2017) melakukan riset mengenai *Finite Element Analysis* 3 dimensi yang diterapkan pada *Insole Shoe Orthotic* bagi penderita kelainan kaki. Riset ini dilakukan dengan cara memindai (*scan*) kaki dari penderita kelainan kaki kemudian digambar ulang lalu dari gambar tersebut dibuat suatu desain *insole shoe orthotic* yang dapat digunakan bagi penderita kelainan kaki tersebut. *Insole shoe orthotic* yang didesain pada riset ini terdiri dari 6 perbesaran pada *insole* yaitu perbesaran 0; 0,5; 0,75; 1; 1,5; 1,75; 2. Dari beberapa variasi tersebut, peneliti melakukan analisis menggunakan *Finite Element Analysis* untuk menentukan

perbesaran yang paling optimal dan nyaman digunakan bagi pasien penderita kelainan kaki.

2.2. Penelitian Sekarang

Berdasarkan hasil penelurusan dari beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, terdapat keterbaruan dalam penelitian ini, yaitu perlu adanya penelitian mengenai *insole shoe orthotic* datar yang ditujukan bagi penderita *metatarsalgia* dengan menggunakan desain *insole shoe orthotic* berbahan EVA Rubber Foam jenis A dengan memadukan *insole shoe orthotic* dengan *pad*. Selanjutnya beberapa desain yang telah dibuat akan dianalisis dengan menggunakan *software* Abaqus 6.13 sehingga akan mendapatkan desain *insole shoe orthotic* yang paling optimal.

Data pasien kelainan kaki *metatarsalgia* diperoleh dari penelitian sebelumnya yaitu dari penelitian yang dilakukan oleh Wicaksana (2017) yang meneliti mengenai penerapan RID dalam perancangan desain *insole shoe orthotic* bagi kelainan kaki termasuk kelainan kaki *metatarsalgia*. Data tersebut selanjutnya digunakan untuk membuat simulasi model mekanika kontak antara kaki dengan *insole shoe orthotic* dengan menggunakan bantuan *software* Abaqus 6.13.

Pada proses untuk mendapatkan desain *insole shoe orthotic* yang paling optimal terdapat beberapa faktor yang digunakan dari beberapa penelitian sebelumnya. Dalam pencarian desain *insole shoe orthotic* yang optimal, digunakan metode Taguchi untuk memastikan apakah hasil simulasi dari desain yang telah dibuat benar – benar optimal. Nantinya hasil penelitian ini dapat membantu dan dapat dijadikan dasar bagi peneliti selanjutnya maupun bagi produsen *insole shoe orthotic*. Selain itu penelitian ini dapat membantu produsen dalam meminimalisirkan biaya produksi dan biaya *trial and error*. Pada tabel 2.1 akan dijelaskan mengenai perbedaan dari beberapa peneliti terdahulu dengan penelitian sekarang.

Tabel 2.1 Perbedaan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Sekarang

Penulis	Judul	Alat	Output	Data	Outcome
Angga Wicaksono (2017)	Perbaikan Desain <i>Insole Shoe Orthotic</i> Menggunakan <i>Curve Based Surface Modelling</i> dari 3D <i>Mesh</i> ke 3D <i>Solid Model</i>	HandySCAN 700, PowerShape 2017	Mendapatkan desain <i>Insole Shoe Orthotic</i> bagi kelainan kaki	Kaki Pasien Kelainan Kaki	Skripsi
Fransiskus Andre Cahya Gunawan (2016)	Analisis Finite Elemen pada material EVA <i>Rubber Dualayer</i> pada Aplikasi <i>Insole Sepatu Orthotic</i>	Abaqus 6.13	Mendapatkan sifat – sifat karakteristik EVA <i>Rubber</i>	Karakteristik Material Eva <i>Rubber</i> dan Nora SLW	Skripsi
Policharpus Putro Permono (2017)	<i>Finite Element Analysis</i> Pada Desain <i>Insole Shoe Orthotic</i>	HandySCAN 700, Abaqus 6.13	Mendapatkan hasil analisis desain <i>insole shoe orthotic</i> dengan membandingkan nilai <i>von misses</i> dan <i>pressure</i>	Kaki Pasien Diabetes	Skripsi
Cendy Hastu Tomo (2017)	Analisis <i>Finite Elemen Insole Shoe Orthotic</i> Pada Kasus Kelainan Kaki Datar	HandySCAN 700, Abaqus 6.13	Mendapatkan hasil analisis desain <i>insole shoe orthotic</i> dengan membandingkan nilai <i>von misses</i> dan <i>pressure</i>	Kaki pasien <i>Flat Feet</i>	Skripsi

Tabel 2.1 Perbedaan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Sekarang (Lanjutan)

Jiayu, dkk (2007)	<i>Development of Finite Element Model of Female Foot for High Heeled Shoe Design</i>	SolidWork 2001, Mimics v9.10, Abaqus v6.6	Mendapatkan Nilai <i>Peak Von Mises, Strain dan Tension</i> dan mendapatkan hasil perbandingan antara <i>insole flat</i> dengan <i>high heel</i> .	Kaki Pasien Normal	<i>Journal of Clinical Biomechanics</i>
Chen, dkk (2015)	<i>Plantar pressure relief under the metatarsal heads – Therapeutic insole design using three-dimensional finite element model of the foot</i>	Abaqus	Desain <i>insole shoe orthotic</i> yang paling optimal bagi penderita <i>metatarsalgia</i>	Data kaki pasien <i>metatarsalgia</i> (<i>insole</i> yang digunakan <i>insole biasa</i>)	<i>Journal of Biomechanics</i>
Anggoro, dkk (2017)	<i>A 3-Dimensional Finite Element Analysis of the Insole Shoe Orthotic for Foot Deformities</i>	PowerShape 2015, Abaqus 6.13	Desain <i>Insole Shoe Orthotic</i> yang paling optimal	Data kaki pasien diabetes	<i>International Journal of Applied Engineering Research</i>

Tabel 2.1 Perbedaan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Sekarang (Lanjutan)

Yusuf Joko Mulyono (2017)	Analisis Elemen Hingga Pada Kasus Mekanika Kontak Kaki Dengan <i>Insole</i> Untuk Penderita <i>Metatarsalgia</i>	<i>PowerShape 2017,</i> <i>Abaqus 6.13</i>	Mendapatkan desain <i>insole</i> <i>shoe orthotic</i> yang optimal bagi penderita <i>metatarsalgia</i>	Data kaki kelainan kaki <i>metatarsalgia</i>	Skripsi
------------------------------	--	---	--	--	---------

2.3. Dasar Teori

Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai teori yang mendasari penelitian ini. Dasar teori ini digunakan sebagai referensi dan acuan dalam melakukan penelitian baik secara metode atau pengumpulan data.

2.3.1. Computer Aided Engineering (CAE)

Computer Aided Engineering (CAE) merupakan salah satu teknologi yang menggunakan sistem komputer untuk menganalisis fungsi dari produk desain *Computer Aided Design (CAD)*, yang memungkinkan desainer untuk mensimulasikan dan mempelajari bagaimana produk tersebut akan berperilaku sehingga desain dapat disempurnakan dan dioptimalkan. Dari analisis tersebut diharapkan nantinya desain yang dihasilkan telah optimal dan dapat digunakan pada proses selanjutnya. CAE menggunakan beberapa metode analisis salah satunya adalah *Finite Element Analysis (FEA)* atau Metode Elemen Hingga. Metode tersebut merupakan salah satu metode yang populer digunakan dalam melakukan analisis. (www.artikelcad.com)

2.3.2. Finite Element Analysis (FEA)

Finite Element Analysis (FEA) atau Metode Elemen Hingga merupakan metode yang digunakan untuk menentukan stress, deformasi, perpindahan panas, fluida dan efek fisik lainnya. Elemen ini digunakan untuk menyelesaikan masalah yang sulit dipecahkan oleh metode lain. Analisis ini digunakan untuk menunjukkan apakah ada masalah pada suatu produk, misal pecah, aus atau produk tersebut telah baik atau tidak. Output dari analisis ini adalah hasil prediksi yang nantinya akan terjadi pada saat produk tersebut diproses maupun digunakan. *Software* yang dapat digunakan untuk menggunakan metode ini adalah Abaqus. (<http://www.infometrik.com>)

2.3.3. Abaqus

Abaqus merupakan salah satu software yang digunakan untuk *Computer Aided Engineering (CAE)*. Saat ini *Abaqus* sering disebut *Abaqus FEA* karena *Abaqus* merupakan software yang digunakan untuk menganalisis suatu desain dengan menggunakan metode *Finite Element Analysis*. *Abaqus* memiliki lima produk inti yakni:

a. Abaqus/Complete Abaqus Environment

Software yang digunakan untuk permodelan dan analisis komponen mekanik. Selain itu produk jenis ini juga digunakan untuk *pre-processing* dan menampilkan hasil analisis elemen hingga.

b. Abaqus/Standard

Software analisis elemen hingga yang memiliki fungsi umum serta memakai skema integrasi secara mutlak (tradisional).

c. Abaqus/Explicit

Software analisis elemen hingga yang memiliki fungsi khusus serta menggunakan skema integrasi secara jelas untuk menghasilkan sistem nonlinear dengan banyak kontak yang kompleks di bawah beban-beban sementara.

d. Abaqus/CFD

Perangkat lunak *computational fluid dynamics* yang menyediakan kemampuan analisis dinamika fluida tingkat lanjut.

e. Abaqus/Electromagnetic

Perangkat lunak *computational electromagnetics* yang memecahkan masalah-masalah elektromagnetik.

2.3.4. Software Abaqus 6.13

Abaqus 6.13 merupakan salah satu *software* yang digunakan untuk melakukan Analisis Metode Hingga atau *Finite Element Analysis (FEA)*. Perangkat lunak ini dapat melakukan simulasi linear dari mulai dari analisis yang paling sederhana hingga analisis *non – linear* yang memiliki kondisi kontak yang kompleks dan rumit. Dalam *software* ini kita dapat mengatur segala kondisi yang dimiliki oleh material maupun indenter sehingga nantinya reaksi yang dihasilkan dari pemodelan yang telah dibuat dapat menghasilkan reaksi yang benar – benar sesuai dengan keadaan aslinya.

Software ini memiliki beberapa fasilitas salah satu fasilitas untuk yang dapat memfungsikan *software* ini menjadi program analisis elastis dan plastis. Kemampuan analisa *multiphysics* yang dimiliki Abaqus dapat digunakan dalam berbagai bidang sesuai dengan kebutuhan penelitian. Selain itu kita dapat melakukan tes dengan memasukkan data secara manual dalam *input file*.

Pengembangan bahasa program dalam Abaqus memungkinkan para desainer lebih mudah dalam memilih metode yang digunakan dalam melakukan proses simulasi dan analisis (Abaqus CAE User Manual, 2003). Spesifikasi yang

dibutuhkan untuk menjalankan instalasi software Abaqus 6.13 dilihat pada gambar di bawah ini.

Tabel 2.2 Spesifikasi Umum Abaqus 6.13

General Requirements		
Product/Feature	Requirement	Specification
<i>Applicable for all Abaqus products supported on this platform</i>	Processor	x86-64
<i>Applicable for all Abaqus products supported on this platform</i>	OS Level³	• Windows XP SP2¹ • Windows Server 2003 • Windows Server 2008 • Windows Server 2008 R2 • Windows HPC Server 2008 • Windows Vista² • Windows 7
Notes: ¹ Windows XP is no longer supported by Microsoft. Any underlying OS specific bugs may not be able to be addressed. SIMULIA recommends upgrading to a later version OS. ² Although some Vista editions have not undergone formal qualification testing, Vista Home Basic, Home Premium, Business and Ultimate editions are all considered compatible with Abaqus 6.11 and are supported. See the Test Configurations web page for tested Vista editions. ³ Microsoft Visual C++ 2005 SP1 and 2008 SP1 runtime libraries are required required and installed during the Abaqus installation. Both 32-bit & 64-bit runtime libraries are required to perform some translator functions. See <u>Microsoft Visual C++ Runtime Requirements for Windows</u> for more information.		

Tabel 2.3 Spesifikasi Tambahan Abaqus 6.13

Additional Requirements		
Product/Feature	Requirement	Specification
Abaqus/CAE, Abaqus/Viewer	Graphics	<u>Abaqus 6.11 Graphics Devices</u>
Abaqus/Standard	Optional GPGPU Card⁴	• Nvidia Tesla C2050 • Nvidia Tesla C2070 • Nvidia Maximus with Tesla C2075 + Quadro 4000⁵ • Nvidia Quadro 6000
Building post processing applications (Abaqus make utility with C++)	C++ Compiler	• Microsoft Visual C++ 2008 SP1⁶ • Microsoft Visual C++ 2010⁷
User Subroutines and building post processing applications with Fortran (Abaqus make utility with Fortran and Abaqus user subroutines)	Fortran Compiler⁸	• Intel Visual Fortran 10.1 • Intel Visual Fortran 11.1
Abaqus/Standard/Explicit/CFD MPI-based parallel execution	Library	MS-MPI 2.0, 2.1, 2.2 ⁹
Abaqus/Standard & Abaqus/Explicit MPI-based Distributed Memory Parallel execution	Interconnect	• Gigabit Ethernet¹⁰ • InfiniBand⁹

Tabel 2.3 Spesifikasi Tambahan Abaqus 6.13 (Lanjutan)

<i>FSI Co-simulation using MpCCI</i>	Partner Product	<i>MpCCI version 3.1.0-4¹¹</i>
<i>Installation</i>	Distribution Media	<i>DVD-ROM</i>
Notes: ⁴ Tested with Nvidia driver version 258.96 ⁵ Tested with Nvidia driver version 275.xx ⁶ Visual C++ 2008 is also known as Visual C++ 9.0 ⁷ Visual C++ 2010 is also known as Visual C++ 10.0 ⁸ Intel Visual Fortran may require additional software pre-requisites. See the Intel Visual Fortran release notes and Intel Visual Fortran Pre-requisites for more information. ⁹ Distributed with Abaqus products ¹⁰ See Support for Distributed Memory Parallel Analyses on Windows Platforms for more information on availability of DMP on Windows/X86-64 ¹¹ Fraunhofer SCAI		

Tabel 2.4 Spesifikasi untuk melihat Dokumentasi Online Abaqus 6.13

Requirements to View Online Documentation		
Product/Feature	Requirement	Specification
<i>Abaqus HTML documentation</i>	Internet Browser¹³	• Firefox 2.0, 3.0 • Firefox 3.5¹² • Internet Explorer 6, 7, 8
<i>Abaqus PDF documentation</i>	PDF Viewer¹⁴	<i>Adobe Reader 8.0, 9.0</i>

**Tabel 2.4 Spesifikasi untuk melihat Dokumentasi Online Abaqus 6.13
(Lanjutan)**

Notes: ¹² Required for Windows 7 ¹³ Later versions of these web browsers are expected to offer acceptable performance. ¹⁴ Later versions of these PDF Readers are expected to offer better performance.

Tabel 2.5 Spesifikasi Lain Abaqus 6.13

Other Platform Notes		
Product/Feature	Requirement	Specification
All supported products	Maximum memory accessible	This platform supports 64-bit addressing, which enables memory usage in excess of 2 GB

2.3.5. Metode Taguchi

Metode *Taguchi* adalah sebuah teknik untuk mengoptimalkan parameter proses dengan mengurangi variasi dari proses tersebut. (Fratila, dkk (2011)). Analisis ini bertujuan untuk meneliti bagaimana parameter proses yang berbeda mempengaruhi *mean* dan varians karakteristik hasil dari proses tersebut dan variabel mana yang berpengaruh secara signifikan. Tujuan utama dari metode ini adalah mendapatkan produk terbaik tanpa mengeluarkan banyak biaya produksi.

Metode Taguchi digunakan dengan cara menerapkan *orthogonal arrays* pada *design of experiments* statistik untuk mendapatkan hasil terbaik dengan jumlah eksperimen yang *minimum*. Hal tersebut sangat penting karena dapat mengurangi biaya dan waktu eksperimen. Tujuan dari eksperimen ini adalah mencari *signal to noise (S/N) ratio*. Ini digunakan untuk mengukur karakteristik hasil proses dan persentase kontribusi dari parameter proses melalui analisis varians. Jika karakteristik ini bersifat kontinu, maka *S/N ratio* dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori yaitu:

- a. *Nominal is the best characteristics.*

- b. *Smaller the better characteristics.*
- c. *Larger the better characteristics.*

Pada penelitian ini kategori yang dipilih adalah *smaller the better characteristics* karena respon yang diharapkan adalah minimasi. Level optimal parameter proses untuk optimasi ini adalah level yang menghasilkan transformasi S/N ratio terbesar.

2.3.6. Metatarsalgia

Metatarsalgia merupakan salah satu penyakit berupa nyeri yang menyerang dibagian bawah *metatarsal head*. Penyebab timbulnya penyakit ini adalah 3 hal yaitu primer, sekunder dan iatrogenik setelah adanya operasi atau bedah kaki (Besse, 2017). Kelainan ini terjadi bisa disebabkan karena faktor genetik dan dapat pula disebabkan oleh tekanan yang berlebihan pada *metatarsal head*. Terkadang banyak orang yang tidak menyadari adanya penyakit ini. Penyakit ini biasanya mengakibatkan nyeri yang berlebih pada telapak kaki khususnya *metatarsal head*. Cara menyembuhkan penyakit ini terdapat beberapa cara yaitu dengan melakukan operasi, atau dapat juga mengurangi rasa sakitnya dengan menggunakan alas kaki yang sesuai dengan kaki penderita *metatarsalgia*.

2.3.7. 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

2.3.8. Ethylene-vinyl Acetate (EVA)

EVA Rubber merupakan *copolymer* yang terbentuk dari monomer ethylene dan vinyl acetate dengan resin dan sifat – sifat material karet. Material ini sering muncul pada jurnal – jurnal yang membahas tentang penggunaannya pada industri peralatan kaki (*footwear*). Material ini banyak digunakan untuk membuat *insole*. Material ini memiliki beberapa kelebihan, diantaranya material ini memiliki

kekuatan terhadap suhu rendah, material ini tahan terhadap *crack* ketika diregangkan, dan material ini dapat menjadi perekat ketika dilelehkan.

2.4. Material Properties

Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai pengertian dari parameter – parameter yang digunakan untuk proses simulasi pada Abaqus 6.13. Parameter yang akan dijelaskan antara lain *mass density*, *young's modulus* dan *von misses stress*.

2.4.1. Mass Density

Mass Density atau massa jenis merupakan pengukuran massa setiap satuan volume benda. Semakin tinggi massa jenis suatu benda, maka semakin besar pula massa setiap volumenya. Massa jenis dilambangkan menggunakan tanda ρ (rho). Persamaan matematis yang dimiliki oleh massa jenis adalah :

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2.1)$$

Keterangan :

ρ : Massa Jenis (Kg / m³)
 m : Massa (Kg)
 v : Volume (m³)

2.4.2. Deformasi dan Modulus Elastisitas (Young's Modulus)

Deformasi merupakan suatu perubahan yang terjadi karena disebabkan oleh suatu gaya yang menekan benda tersebut sehingga benda mengalami perubahan bentuk. Deformasi dibagi menjadi 2 yaitu deformasi plastis dan deformasi elastis. Deformasi plastis adalah perubahan bentuk yang terjadi pada suatu benda dan tidak dapat kembali ke bentuk semula. Hal ini dikarenakan tekanan yang terjadi melebihi *yield point* sehingga bentuk tidak kembali ke bentuk semula. Sementara deformasi elastis adalah perubahan bentuk karena suatu tekanan tetapi dapat kembali ke bentuk semula. Ini disebabkan karena tekanan tidak melebihi *yield point* suatu benda.

Elastisitas suatu material sangat ditentukan modulus elastisitasnya (*young's modulus*). Terdapat persamaan matematis yang menunjukkan rumus dari modulus elastisitas. Persamaan matematisnya adalah sebagai berikut :

$$E = \frac{\sigma}{e} \quad (2.2)$$

Keterangan :

E : Modulus Elastisitas

σ : Tegangan (MPa)

e : Tegangan

2.4.3. Von Mises Stress

Tegangan atau dalam istilah lain *stress*, adalah besaran pengukuran intensitas gaya atau reaksi yang timbul per satuan luas. Tegangan dapat dibagi menjadi 2 yaitu *Engineering Stress* dan *True Stress*. Satuan untuk pengukuran ini adalah *Newton / mm²* (Mpa). Jika benda dikenakan suatu beban maka terjadi pertambahan panjang suatu nilai tertentu. Persamaan matematis dari *engineering stress* adalah sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.3)$$

Keterangan :

σ : Tegangan (Pa, N/m²)

F : Beban yang diberikan (N, Dyne)

A₀ : Luas Penampang mula – mula (m²)

Teori yang dikembangkan oleh Richard Elder von Mises menyatakan bahwa sebuah benda pejal yang elastis (ductile) akan terdistorsi secara permanen atau luluh ketika kepadatan energi distorsi mencapai titik nilai kritis untuk material penyusun dari benda tersebut. Titik tersebut disebut Yield Point atau batas luluh.