KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah, Allah *Subhanahu wa Ta'ala* telah melimpahkan nikmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skiripsi dengan judul " **Optimasi Desain Alat Orthodontic untuk Pengamatan Pengaruh Diabetes pada Gigi Tikus**", yang diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan akademik memperoleh gelar Sarjana Teknik.

Pada kesempatan ini Penulis tidak lupa mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT., selaku ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang
2. Bapak Dr. Eng. Moch. Agus Choiron, ST., MT., selaku pembimbing I serta Bapak Ir. Endi Sutikno selaku pembimbing II yang telah banyak memberikan bimbingan, saran, serta ilmunya yang membantu dalam penyelesaian skripsi ini
3. Bapak drg. Hafiedz Maulana, Ibu drg. Amandia Dewi Permana Shita, dan Ibu drg. Nuzulul Hikmah yang telah memberikan ide dan kerja samanya dalam penyusunan skripsi ini
4. Kedua orang tua tercinta, Bapak H. M Darman dan Ibu Hj. Musriniati, semoga Allah senantiasa melindungi mereka
5. Segenap Staf Pengajar khusunya dosen-dosen dibidang konstruksi mesin dan jajaran staf karyawan Jurusan Teknik Mesin dan Fakultas Teknik
6. Seluruh sahabat KBMM Universitas Brawijaya khusunya Mesin 2009
7. Laboratorium Studio Perancangan dan Rekayasa Sistem Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah memberikan dukungan dalam menyelesaikan skripsi ini
8. Semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini, yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu

Akhir kata, penulis mengharapkan skripsi ini dapat memberikan manfaat yang positif pada pembaca. Semoga ide-ide baru, saran dan kritik yang membangun untuk kedepannya.

Malang, Juli 2013

Penulis

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

RINGKASAN

Tri Handoko W, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2013, *Optimasi Desain Alat Orthodontic untuk Pengamatan Pengaruh Diabetes pada Gigi Tikus,*Dosen Pembimbing : Moch. Agus Choiron dan Endi Sutikno.

Orthodontic adalah salah satu cabang dari ilmu kedokteran, khususnya kedokteran gigi yang mempelajari cara memperbaiki kecacatan seseorang baik dari segi skeletal pada tulang kepala (*cranium*) maupun susunan dari giginya. Ilmu *orthodontic* adalah ilmu yang cukup rumit, dengan banyak perhitungan matematis dari hubungan tulang kepala dan gigi (Moyers, et al : 1988).

Percobaan gigi diabetes diawali pada gigi tikus yang telah diberi stimulan diabetes. Dibutuhkan desain alat ortodontik agar dapat menghasilkan gaya ortodontik sebesar 30 gram force (Mirzakouchaki *et al*., 2011). Namun dalam kenyataannya untuk mendapatkan desain dengan *orthodontic force* yang mendekati harus melakukan beberapa kali percobaan.

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan optimasi desain pada alat ortodontik sehingga dapat dihasilkan gaya orthodontik yang diharapkan, sehingga dapat membantu dunia kedokteran dalam usaha penerapan riset alat orthodontik pada penderita *diabetes*.

Dari hasil optimasi yang telah dilakukan didapatkan dimensi geometri alat orthodontik yang dapat memberikan gaya mendekati 30 gram force atau 0.2946 N akibat *spring effect* dari bentuk yang digunakan yaitu dengan dimensi panjang kaki pengait 10 mm; dimensi diameter bahan yang digunakan 0.012 inchi; dan besar bukaan sudut antar kaki 9.95^{o}

Kata kunci : Optimasi Desain, *spring effect, Orthodontic*

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR i
RINGKASAN ii
DAFTAR ISI iii
DAFTAR GAMBAR v
DAFTAR TABEL vi
PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Batasan Masalah 2
1.4 Tujuan Penelitian 2
1.5 Manfaat Penelitian 2
TINJAUAN PUSTAKA 4
2.1 Alat Orthodontic 4
2.2 Optimasi Desain 5
2.2.1 Proses Optimasi Desain 6
2.2.2 Langkah-langkah dalam Optimasi Desain 8
2.2.3 Metode dan Langkah Pendekatan Optimasi Desain pada Ansys 9
2.2.4 Metode Optimasi dengan Goal Driven Optimization 10
2.3 Analisa Tegangan dan Regangan 11
2.3.1 Tegangan 11
2.3.2 Regangan 14
2.3.3 Hubungan antara Tegangan dan Regangan 14
2.4 Defleksi 17
2.5 Metode Elemen Hingga 18
2.5.1 Sistem Koordinat 18
2.5.2 Prosedur Perhitungan Metode Elemen Hingga 19
2.5.3 Tipe Elemen untuk Analisis Tiga Dimensi 22
2.6 Hipotesis 25
METODOLOGI PENELITIAN 26
3.1 Metode Penelitian 26
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian 26
3.3 Variabel Penelitian 26

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

3.4 Bahan dan Peralatan Penelitian 27
3.6 Prosedur Penelitian 28
3.7 Meshing 30
3.8 Langkah-langkah Simulasi pada Software 31
3.8.1 Preprocessing 31
3.8.2 Solution 32
3.8.3 Postprocessing 32
3.9 Alur Penelitian 32
HASIL DAN PEMBAHASAN 34
4.1 Hasil Simulasi Pembebanan 34
KESIMPULAN DAN SARAN 45
5.1 Kesimpulan 45
5.2 Saran 45

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Alat *Orthodontic*	4
Gambar 2.2	Alur Perencanaan Desain dan Manufaktur cara konvensional	6
Gambar 2.3	Alur Perencanaan Desain dan Manufaktur dengan Optimasi Desain	7
Gambar 2.4	Batang yang diberi gaya aksial (P) pada ujungnya	11
Gambar 2.5	Benda padat yang diberi gaya dari berbagai arah	12
Gambar 2.6	Tegangan pada bidang kubus	13
Gambar 2.7	Hubungan Tegangan dan Regangan	15
Gambar 2.8	Hubungan sistem koordinat global dengan koordinat lokal elemen.	19
Gambar 2.9	Hubungan sistem koordinat lokal dengan koordinat natural elemen.	19
Gambar 2.10	Elemen *Tetrahedral*	22
Gambar 3.1	Pemodelan 3 Dimensi alat *orthodontic*	27
Gambar 3.2	Pemodelan material pada material SUS304V	28
Gambar 3.3	Model Pembebanan Alat	29
Gambar 3.5	Alur Perencanaan Desain dan Manufaktur dengan Optimasi Desain	30
Gambar 3.6	*Meshing* Benda Kerja	31
Gambar 3.7	Alur Penelitian Optimasi Desain	33
Gambar 4.1	Hasil dari pembebanan yang telah diberikan dari salah satu model trial.	34
Gambar 4.2	Uji Normalitas dari hasil nilai *Design of Experiment* sebelumnya	37
Gambar 4.3	Hubungan antara dimensi diameter bahan dan sudut bukaan salah satu kaki pengait dengan *force reaction* pada salah satu kaki	38
Gambar 4.4	*Local Sensitivity Chart* dari hubungan input dan output yang diinginkan	40
Gambar 4.5	Geometri Hasil Optimasi Kandidat Kedua dengan Gaya Orthodontik 0.2942 N	43

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

DAFTAR TABEL

Tabel 4.2 Tabel hubungan input parameter dan *factorial number* terhadap data yang dibangkitkan 36
Tabel 4.3 Hasil perhitungan statistik dari pengujian data sampel terhadap output yang ditentukan. 39
Tabel 4.4 Hasil Optimasi desain menggunakan MOGA didapat tiga kandidat terbaik 42
Tabel 4.5 Dimensi Geometri Hasil Optimasi Desain untuk Proses Manufaktur 43
Tabel 4.6 Hasil Analisa Gaya Orthodontik Setelah Geometri Bahan Sesuai dengan Kebutuhan Manufaktur 44

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Orthodontic adalah salah satu cabang dari ilmu kedokteran, khususnya kedokteran gigi yang mempelajari cara memperbaiki kecacatan seseorang baik dari segi skeletal pada tulang kepala (*cranium*) maupun susunan dari giginya. Ilmu *orthodontic* adalah ilmu yang cukup rumit, dengan banyak perhitungan matematis dari hubungan tulang kepala dan gigi (Moyers, et al : 1988). Tujuan dari perawatan *orthodontic* antara lain memperbaiki fungsi pengunyahan (*mastikasi*), bicara (*fonasi*), memperbaiki sendi rahang (*temporo mandibular joint*), kecantikan (estetis), memperbaiki gigi berjejal yang menyebabkan *oral hygine* menjadi buruk sehingga mudah terkena karies, memperbaiki jalan nafas yang salah karena melalui mulut, dan *bad habbit* lain seperti mengisap jempol, bertopang dagu, menjulurkan lidah, dan masih banyak alasan yang lainnya.

Tidak hanya untuk orang yang sehat saja, perawatan gigi juga dapat diberikan kepada orang yang sakit seperti pada penderita *diabetes*. Alat *orthodontic* yang dipakai didesain untuk memberikan penekanan lebih kecil dari alat orthodontik untuk orang sehat dikarenakan gigi penderita diabetes lebih rapuh daripada gigi pada manusia normal pada umumnya, sehingga dibutuhkan modifikasi alat tersebut agar sesuai dan dapat digunakan oleh penderita *diabetes* tersebut. Penelitian awal biasanya dilakukan terhadap hewan yaitu tikus putih yang nantinya dapat diteruskan untuk penelitian selanjutnya terhadap manusia. Dalam hal ini nantinya tikus putih akan diberikan suntikan stimulan untuk dapat menderita *diabetes* sehingga memiliki gigi sesuai dengan kasus pengamatan yang diinginkan.

Desain alat ortodontik dibuat agar dapat menghasilkan gaya ortodontik sebesar 30 gram force (Mirzakouchaki *et al*., 2011). Namun dalam kenyataannya desain yang dibuat tidak selalu memberikan hasil *orthodontic force* yang diharapkan. Pengaruh ukuran panjang kaki dan besar bukaan sudut dari desain alat ortodontik memberikan pengaruh terhadap besar gaya orthodontik. Di sisi lain, optimasi desain yang telah diterapkan oleh ilmuwan teknik mesin khususnya yang bergerak di bidang desain dan manufaktur dapat membantu memberikan solusi sehingga dapat mengurangi trial-error akibat dari modifikasi alat.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Dari latar belakang di atas, penting untuk dilakukan optimasi desain pada alat ortodontik sehingga dapat dihasilkan gaya orthodontik yang diharapkan, sehingga dapat membantu dunia kedokteran dalam usaha penerapan riset alat orthodontik pada penderita diabetes.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah disebutkan, maka permasalahan yang akan diteliti adalah bagaimana optimasi desain dari besar bukaan sudut belitan, panjang kaki pengait dan diameter bahan dari alat ortodontik untuk mendapatkan *orthodontic force* yang diinginkan.

1.3 Batasan Masalah

Untuk mempermudah analisis dan agar permasalah tidak meluas, maka perlu diuraikan batasan masalah sebagai berikut :

1. Penelitian dilakukan secara simulasi tiga dimensi dengan menggunakan *Ansys Workbench*

2. Teknik optimasi desain menggunakan *Goal Driven Optimization*

3. Gaya orthodentik yang ingin dicapai adalah sebesar 30 gramforce.

3. Jenis bahan yang digunakan adalah SUS 304 V.

4. Dipakai variasi sudut bukaan belitan pada range $10^o \leq \alpha \leq 20^o$.

5. Dipakai variasi panjang kaki pengait pada range 10 mm $\leq l \leq$ 20 mm.

6. Dipakai variasi diameter bahan yang digunakan pada range 0.012 inchi $\leq D \leq$ 0.014 inchi.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian adalah untuk mendapatkan optimasi desain dari besar bukaan sudut belitan, panjang kaki pengait dan diameter bahan dari alat ortodontik untuk mendapatkan *orthodontic force* yang diinginkan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Memberikan detail tahapan optimasi desain pada desain alat orthodontik.
2. Membantu mewujudkan desain alat-alat pada bidang kedokteran khususnya kedokteran gigi.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Alat Orthodontic

Orthodhontic adalah salah satu cabang ilmu bidang kedokteran gigi yang mempelajari tentang perbaikan susunan gigi dan kecacatan dari segi skeletal pada tulang kepala. Untuk aplikasi perbaikan gigi salah satunya memakai alat *orthodhontic* (Gambar 2.1).

Gambar 2.1 Alat *Orthodontic*
Sumber : Amandia, 2013

Kilic (2010) melakukan pembuatan dua macam bentuk alat orthodontik yang nantinya digunakan pada kelinci percobaan. Percobaan ini menggunakan panjang pengait kawat sebesar 13 mm dan dengan bukaan sudut belitan 70° serta variasi diameter bahan yang digunakan sebesar 0.012 inchi dan 0.014 inchi. Dari hasil yang didapatkan diketahui bahwa untuk diameter bahan sebesar 0.012 inchi dihasilkan gaya sebesar 20 gram force dan untuk diameter 0.014 inchi didapatkan 60 gram force. Dapat disimpulkan pula dalam percobaan ini bahwa pengaruh perbedaan geometri pada diameter bahan dapat mempengaruhi besar gaya orthodontik yang dihasilkan.

Mirzakouchaki (2011) melakukan pengujian pada tikus yang telah diberi suntikan stimulan *diabetes.* Kemudian setelah dipasang alat orthodontik pada gigi tikus didapatkan bahwa gaya yang diperlukan agar orthodontik bisa mendorong gigi tikus sebesar 30 gram force. Bahan orthodontik yang digunakan dari kawat *stainless steel* berdiameter 0.35 mm. Penelitian ini memberikan informasi penting di bidang kedokteran gigi dimana gaya orthodontik yang diberikan sebesar 30 gram force.

Amandia (2013) melakukan pengujian pada tikus percobaan yang telah diberi stimulan suntikan *diabetes*. Kemudian diuji dengan tiga macam orthodontik, yaitu sebesar 10 gram force, 20 gram force, dan 30 gram force. Untuk mendapatkan gaya orthodontik yang diinginkan, maka bentuk dari setiap geometri dari alat orthodontik yang diinginkan berbeda-beda pula. Perbedaan ini terletak pada bukaan sudut belitan dari alat orthodontik yaitu sebesar 10°, 20°, dan 30°. Panjang kaki dan diameter koil yang digunakan yaitu sebesar 10 mm dan 0.012 inchi. Dalam hal tersebut dapat disimpulkan pula bahwa pengaruh bukaan sudut belitan yang digunakan mempengaruhi gaya orthodontik yang dihasilkan pula.

2.2 Optimasi Desain

Optimasi desain adalah tindakan, proses atau metodologi dalam membuat suatu desain secara sempurna, fungsional, atau seefektif mungkin; khususnya pada fungsi matematik (seperti mencari fungsi maksimum pada suatu model) yang saling terikat dengan faktor-faktor lain yang mempengaruhinya. Dengan demikian hasil yang diharapkan memberikan efek yang seimbang dan setara pada setiap faktor yang mempengaruhinya.

Saat ini desain adalah salah satu pilar utama dalam teknologi yang berkaitan erat dengan manufaktur. Dalam proses pembuatannya diharapkan produk yang akan dibuat dapat memenuhi kriteria dari pasar atau keinginan masyarakat. Awal perkembangan dari desain dan manufaktur hanya fokus dalam perencanaan desain dan pembuatan saja. Setelah *blueprint* dari bidang desain diberika kepada bidang manufaktur, maka setiap informasi yang telah dibuat segera dikerjakan dalam pembuatannya. Apabila setelah dikaji bahwa produk yang dihasilkan tidak memenuhi dari keinginan pasar, maka perlu evaluasi dari *blueprint* yang telah dibuat.

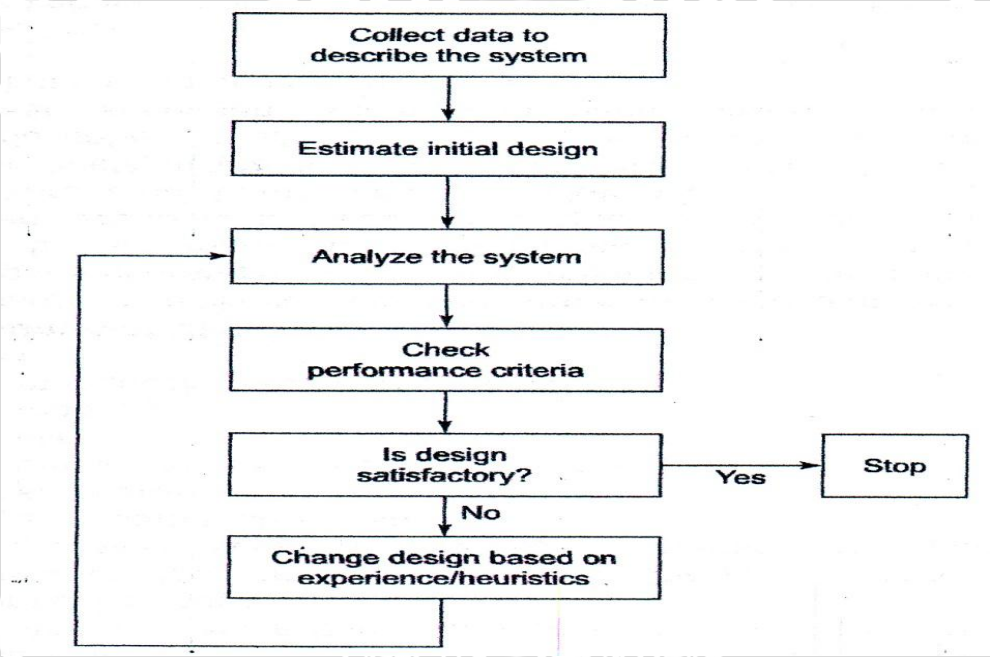
Kemajuan era saat ini pula menyebabkan krisis yang meningkat akibat pertambahan penduduk pula. Hal ini mengakibatkan seluruh elemen dalam pemenuhan proses produksi juga mengalami kendala, seperti biaya dan pemenuhan kebutuhan masyarakat. Apabila tetap dilakukan proses yang tetap, maka banyak kerugian yang akan dialami sebagai akibat dari prosedur yang masih belum berkembang. Akibat dari hal ini muncul ilmu baru yang disebut optimasi desain.

Optimasi desain lebih fokus terhadap proses desain yang dibuat. Hal ini diharapkan dapat menghasilkan produk yang hanya mengalami modifikasi produk

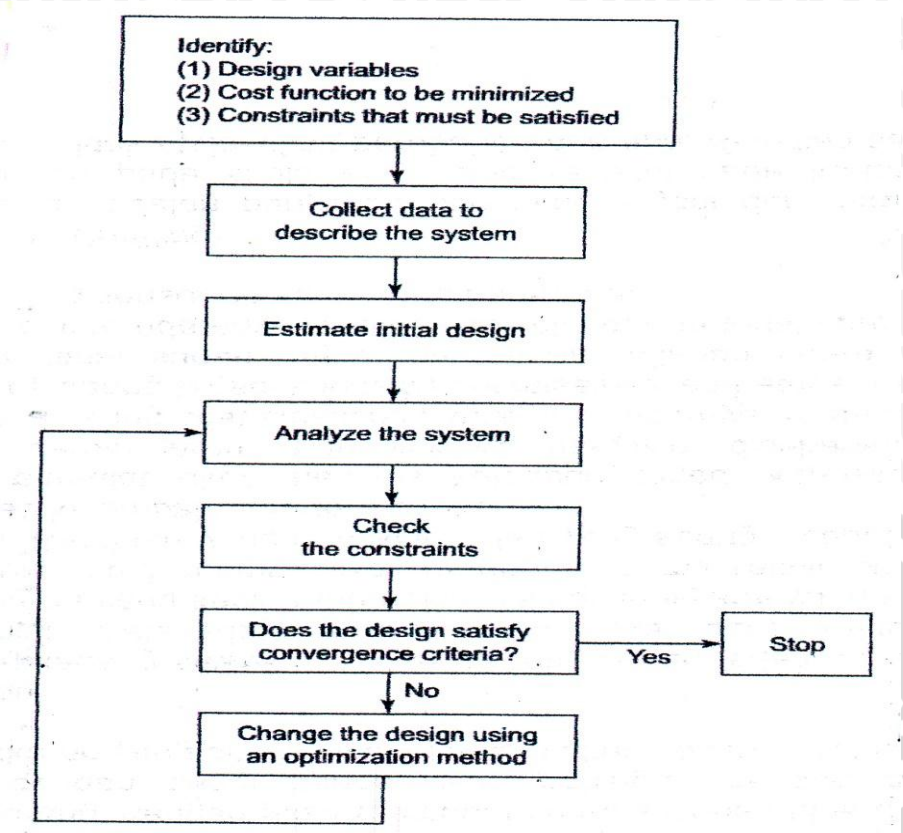
sedikit sekali atau bahkan tidak ada. Dalam hal ini nantinya di proses manufaktur hanya mementingkan prosesnya saja tanpa harus mengkhawatirkan hasil yang tidak sesuai dengan kebutuhan pasar.

2.2.1 Proses Optimasi Desain

Munculnya ilmu optimasi desain memberikan perbedaan dalam suatu proses produksi yang ada saat ini. Dalam optimasi desain, produk yang direncanakan mengalami sedikit atau bahkan tidak ada sama sekali modifikasi dari produk yang dibuat. Perbedaan tersebut dapat diamati pada komparasi alur proses produksi dengan proses konvensional dan alur yang menerapkan optimasi produksi.



Gambar 2.2 Alur Perencanaan Desain dan Manufaktur cara konvensional
Sumber : Arora, Jasbir. Introduction to Optimum Design - 2 ed. 2004



Gambar 2.3 Alur Perencanaan Desain dan Manufaktur dengan Optimasi Desain
Sumber : Arora, Jasbir. Introduction to Optimum Design - 2 ed. 2004

Dapat dilihat dari perbedaan dua alur yang ada (Gambar 2.2), dimana pada proses konvensional setelah produk jadi hasilnya memuaskan, maka selesai sudah produk yang dihasilkan. Apabila sebaliknya, maka pada tahap selanjutnya merubah desain berdasarkan pengalaman penyelesaian masalah-masalah sebelumnya. Apabila masalah yang terjadi sesuai dengan pengalaman yang pernah dialami dan mengetahui solusi yang harus dilakukan maka tidak akan terjadi masalah. Jika yang dihadapi adalah masalah yang baru, maka perlu pengkajian detail terhadap masalah yang dihadapi sehingga mengorbankan banyak biaya dan waktu produksi. Hal tersebut terus berulang hingga didapatkan produk yang sesuai dengan yang diharapkan.

Berbeda dengan proses yang dilakukan dengan optimasi desain (Gambar 2.3). Pada proses ini awal sebelum melakukan pembuatan telah mengindentifikasi batasan masalah yang akan dibahas. Kemudian malakukan kajian pustaka yang nantinya sebagai dasar untuk perkiraan sementara dalam pembuatan desain. Apabila produk atau hasilnya tidak sesuai maka perlu pengkajian ulang dimana tidak berdasarkan pengalaman yang ada saja, namun tetap mengacu dari batasan masalah yang telah ditentukan sejak awal.

Dari hal tersebut diharapkan mendapatkan solusi yang tetap mengacu dari batasan masalah sebelumnya.

2.2.2 Langkah-langkah dalam Optimasi Desain

a. *Project/Problem Statement*

Proses formulasi dimulai dengan mengembangkan suatu deskripsi pernyataan untuk suatu project/masalah. Pernyataan tersebut menjelaskan seluruh tujuan dari project dan permintaan yang akan dihadapi.

b. *Data and Information Collection*.

Untuk mengembangkan formulasi matematika dari suatu masalah, dibutuhkan informasi tambahan seperti properti material, performa yang diinginkan, ketersediaan bahan baku, harga bahan baku, dan informasi lain yang relevan. Sebagai tambahan yang paling utama adalah kemampuan untuk uji coba desain yang dibuat. Dangan demikian, prosedur analisa dan peralatan yang digunakan perlu diidentifikasikan pula.

c. *Identification/Definition of Design Variables*.

Step selanjutnya pada proses formulasi adalah mengidentifikasi variabel yang menjelaskan suatu sistem yang disebut variabel desain. Poin-poin utama dalam hal tersebut adalah :

- Variabel desain harus berbeda dengan desain yang lain. Jika tidak, maka akan ada beberapa kesetaraan batasan antara satu desain dengan desain yang lain. Sebaliknya, apabila ada kesetaraan batasan, maka variabel desain yang dibuat bergantung dari batasan yang ditentukan.
- Meminimalkan jumlah dari variabel desain yang dibutuhkan untuk memformulasi masalah optimasi desain yang benar ada.
- Semakin banyak parameter tetap semakin banyak yang ditetapkan sebagai variabel desain pada bagian formulasi permasalahan. Selanjutnya, beberapa dari variabel dapat dijadikan nilai tetap.
- Nilai numerik harus diberikan pada tiap variabel saat variabel desain telah terdefinisi untuk dapat menentukan bahwa desain percobaan pada sistem yang telah ditentukan

d. *Identification of a Criterion to be Optimized*

Dalam hal ini mengacu pada masalah yang akan diselesaikan, dimana nantinya dapat diberikan formulasi nilai matematika sebagai batasan-batasan nilai yang akan digunakan sebagai jawaban atas masalah yang dihadapi. Formulasi ini berhubungan dengan variabel-variabel informasi yang telah ada, sehingga jawaban dari masalah yang dihasilkan berupa daerah terima dari suatu persamaan yang tidak akan keluar dari persamaan dan variabel-variabel yang telah diketahui.

e. *Identification of Constraints*

Setelah formulasi dari permasalahan yang akan ditentukan telah dibuat, maka perlu diberikan nilai numerik dan batasan-batasan nlai untuk variabel-variabel nilai yang berpengaruh dengan nilai yang dihasilkan pada persamaan masalah yang akan dihasilkan. Hal ini pula bertujuan bahwa pengaruh-pengaruh yang dapat mempengaruhi pengamatan yang diharapkan memiliki nilai batas, agar pengamatan tidak melebar dan meluas.

2.2.3 Metode dan Langkah Pendekatan Optimasi Desain pada Ansys

Dalam software Ansys terdapat Metode dan Langkah Pendekatan yang digunakan dalam Optimasi Desain. Metode yang digunakan pada Ansys untuk optimasi desain adalah :

- Sub-problem Approximation Method
  Adalah suatu dasar pendekatan menggunakan perkiraan dari fungsi objektif. Metode ini pada umumnya lebih efisien
- First Order Method
  Adalah pendekatan berdasarkan teknik pencarian dengan menggunakan gradien (contoh, laju perubahan) dari variabel terikat dan mengacu pada variabel desain. Pada umumnya metode ini lebih akurat
- User Method
  Implementasi dari fungsi optimasi dari pengguna pada subrutin bentuk. Metode ini mencari nilai minimal dari fungsi objektif

Untuk langkah pendekatan optimasi desain pada Ansys ada enam macam, yaitu :

- Single Iteration Design Tools

Menggunakan satu langkah yang melewati suatu analisa yang menggunakan setting spesifikasi desain pada Ansys. Memfasilitasi untuk pengguna teori sebab akibat.

- Random Tools

  Menghasilkan beberapa hasil desain terbaik menggunakan variasi dari variabel desain
- Factorial Tools

  Membaca dengan cepat seluruh titik-titik ekstrim pada area desain
- Gradient Tools

  Menggunakan gradien dari fungsi objek dan variabel tetap
- Sweep Tools

  Mengamati dan menganalisa seluruh daerah desain dengan satu variabel pada suatu waktu
- User Tools

  Menggunakan fungsi tersendiri dari pengguna.

2.2.4 Metode Optimasi dengan Goal Driven Optimization

Salah satu metode optimasi yang banyak dipakai adalah *Goal Driven Optimization*, dimana teknik optimasi ini menggunakan batasan (constrain), optimasi dengan teknik multi-objektif dimana dapat memberikan kemungkinan terbaik dari suatu desain yang sebelumnya ditampilkan beberapa contoh lain yang dibatasi oleh parameter yang telah ditentukan. Metode optimasi ini digunakan sebagai solver pada kasus optimasi desain di software ANSYS. Sebelum mendapatkan hasil dari Metode ini, di dalam software ANSYS terlebih dahulu menggunakan teknik *Design Optimization Explorer* dan *Response Surface Cells*. Secara garis besar, langkah-langkah yang dilakukan pada Ansys adalah sebagai berikut :

1. Pada kolom optimasi dapat menentukan bagian-bagian yang akan dioptimasi, seperti radius fillet, massa, panjang, dll.

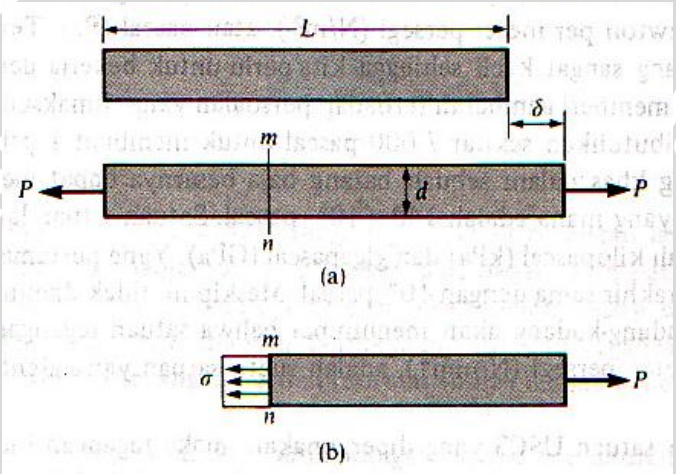
2. Menentukan batasan nilai inputan dan output yang menjadi batas dari desain yang diinginkan.

3. Menentukan grafik hubungan dari input terhadap output yang diinginkan. Grafik yang ditampilkan dapat berupa grafik garis, dan batang.

2.3 Analisa Tegangan dan Regangan

2.3.1 Tegangan

Tegangan (*stress*) didefinisikan sebagai gaya aksial berupa tarikan atau tekanan yang bekerja pada setiap luas penampang (*cross section*). Dalam kasus yang sederhana dapat diilustrasikan pada sebuah batang yang diberi gaya-gaya aksial sehingga menimbulkan suatu tarikan yang sama rata pada batang (*tension*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Batang yang diberi gaya aksial (P) pada ujungnya
Sumber : Gere, 2004

Untuk menyelidiki tegangan internal yang terjadi, maka dibuat potongan *mn* (Gambar 2.4a). Kemudian batang yang sudah di potong tersebut dipisahkan menjadi sebuah *free body* (Gambar 2.4b). Beban tarik P bekerja pada ujung bebas sebelah kanan benda bebas ini, sedangkan bagian yang lain bekerja gaya aksi dari batang yang dipotong. Intensitas gaya (σ) yaitu gaya per luas satuan disebut tegangan (*stress*). Dengan menganggap bahwa tegangan terdistribusi secara merata pada seluruh penampang batang, maka resultan sama dengan intensitas σ dikali luas penampang A dan batang. Dimana besarnya resultan sama dengan P yang dikenakan tetapi arahnya berlawanan.

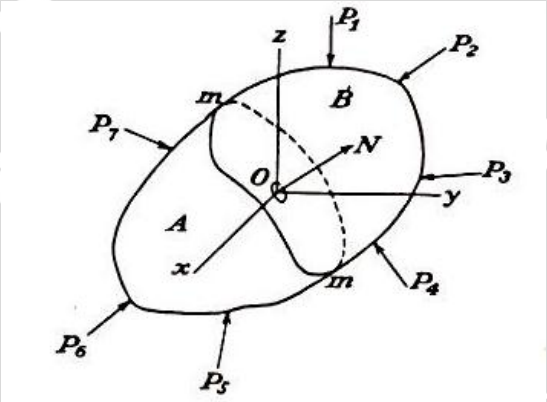
$$\sigma = \frac{P}{A}$$ (Gere, 2004)

Keterangan : σ adalah besarnya tegangan (Pascal)

P adalah besarnya gaya yang bekerja (N)

A adalah luas penampang (m^2)

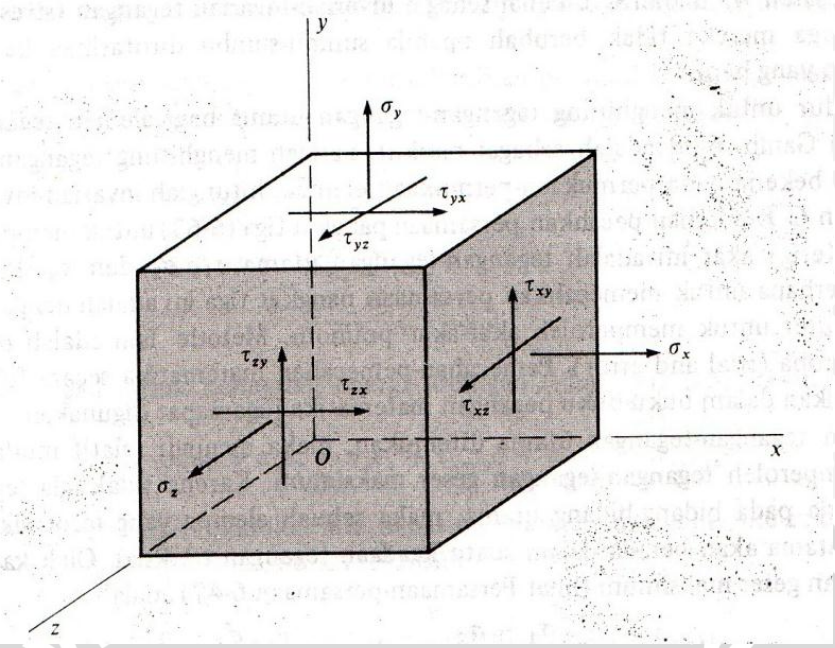
Pada kasus umum tegangan tidak terbagi merata di sepanjang potongan penampang. Hal ini bisa dilihat pada Gambar 2.5 berikut :



Gambar 2.5 Benda padat yang diberi gaya dari berbagai arah
Sumber : Timoshenko, 1986

Dari gambar 2.5 di atas, tegangan tidak terbagi merata sepanjang *mm*. Untuk memperoleh besar gaya yang bekerja pada luasan kecil δA, misalnya dari potongan penampang *mm* pada titik O sebarang, kita amati bahwa gaya yang bekerja pada elemen luas ini diakibatkan oleh kerja bahan bagian B terhadap bahan bagian A yang dapat diubah menjadi resultan δP. Apabila terus ditekan luas elemen δA, harga batas rasio δP/δA menghasilkan besar tegangan yang bekerja pada potongan penampang *mm* pada titik O.

Tegangan juga dapat terjadi pada suatu bidang. Tegangan yang terjadi adalah tegangan normal dan tegangan geser di semua permukaannya. Hal ini dapat ditunjukkan pada Gambar 2.6 berikut ini :



Gambar 2.6 Tegangan pada bidang kubus
Sumber : Gere, 2004

Penulisan tegangan pada suatu titik dapat dilakukan dengan penulisan tensorial dengan matriks sebagai berikut :

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \qquad \text{(Grandin, 1986)}$$

Arti dari penulisan tersebut adalah indeks pertama menyatakan bidang tempat tegangan tersebut bekerja dan indeks kedua menyatakan arah tegangan tersebut. Tegangan dengan indeks pertama dan kedua sama merupakan tegangan normal, sedangkan yang indeksnya berlainan merupakan tegangan geser. Tegangan normal berharga positif, bila merupakan tegangan tarik dan bertanda negatif bila merupakan tegangan kompresi. Untuk tegangan geser berharga positif bila mempunyai kecenderungan memutar elemen kubus searah jarum jam dan bertanda negatif bila cenderung memutar elemen kubus berlawanan arah jarum jam.

Dalam menganalisa tegangan maka kita akan menjumpai istilah tegangan prinsipal (*principal stress*), tegangan prinsipal adalah tegangan yang bekerja pada daerah prinsipal dimana tegangan geser berharga nol dan hanya tegangan normal saja yang bekerja. Arah tegangan utama disebut arah prinsipal.

Untuk titik yang mendapat tegangan dua dimensi, artinya $\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$, maka sumbu prinsipal ketiga dianggap berhimpit dengan sumbu z dan dengan demikian harga tegangan ke arah sumbu prinsipal ketiga akan sama dengan tegangan ke arah sumbu z yang berharga nol ($\sigma_3 = \sigma_z = 0$).

2.3.2 Regangan

Regangan adalah perubahan bentuk tanpa dimensi untuk menyatakan adanya deformasi. Regangan yang ditimbulkan dari gaya tarik disebut dengan regangan tarik (*tensile strain*) yang menyatakan suatu pemanjangan atau tarikan dari bahan. Sedangkan jika batangnya mengalami penekanan, maka dinamakan regangan tekan (*compressive strain*). Regangan tarik berharga positif sedangkan regangan tekan berharga negatif.

Karena regangan adalah perbandingan antara dua ukuran panjang, maka regangan tidak memiliki dimensi (*dimension less quantity*). Regangan karena gaya tarik dapat ditulis dalam persamaan berikut :

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \qquad \text{(Gere, 2004)}$$

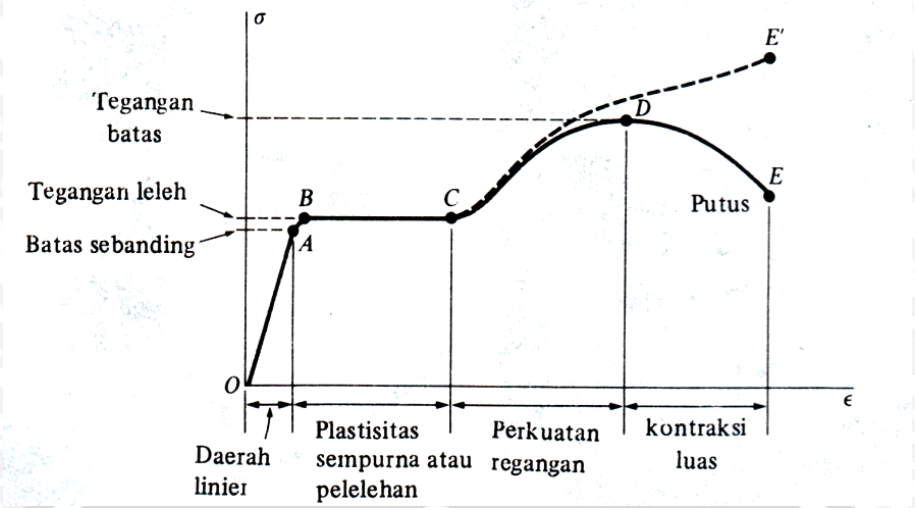
Keterangan : ε = besarnya regangan

δ = besarnya pertambahan panjang (m)

L = panjang awal (m)

2.3.3 Hubungan antara Tegangan dan Regangan

Tegangan dan regangan senantiasa berhubungan pada setiap bahan (walaupun hubungan ini dapat berubah karena suhu, laju pembebanan dan sebagainya). Pada kondisi tegangan di bawah tingkat kristis akan memenuhi Hukum Hooke yang menyatakan bahwa deformasi adalah berbanding lurus terhadap beban yang ditimbulkan. Hal ini sesuai dengan diagram tegangan regangan yang ditunjukkan dalam Gambar 2.7 berikut :



Gambar 2.7 Hubungan Tegangan dan Regangan
Sumber : Gere, 1987

Dalam hal ini :

- Titik proporsional merupakan titik kesetimbangan antara tegangan dan regangan.
- Titik luluh merupakan titik tempat terjadinya penambahan regangan tanpa disertai penambahan beban.
- Titik *ultimate* merupakan titik tempat tertinggi yang dapat dicapai oleh bahan tersebut.
- Titik patah merupakan titik bahan tersebut mengalami patah.

Di dalam diagram tegangan regangan dikenal :

- Daerah elastis yaitu daerah tempat terjadinya deformasi elastis (dari nol sampai batas elastis).
- Daerah plastis merupakan daerah tempat terjadinya deformasi plastis plastis (dari batas elastis sampai titik *ultimate*).
- Daerah patah merupakan daerah tempat terjadinya patah.

Hukum Hooke secara sistematis dirumuskan sebagai berikut :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$ (Gere, 2004)

Dimana : E = Modulus Elastisitas/*Modulus Young* (Pascal)

σ = Tegangan (Pascal)

ε = Regangan

Modulus Elastisitas (*Modulus Young*) dinyatakan sebagai perbandingan antara tegangan dan regangan. Modulus Elastisitas merupakan karakteristik suatu logam tertentu karena setiap logam memiliki Modulus Elastisitas yang berbeda.

Pada kondisi plastis, deformasi yang terjadi pada material bersifat *irreversible* dan pada kondisi ini hukum Hooke sudah tidak berlaku lagi. Salah satu karakteristik yang perlu dipahami dari deformasi plastis pada material logam adalah logam tidak mempunyai sifat mampu tekan (*incompressible*), sehingga pada deformasi plastis volume dari material logam adalah konstan.

Bila dilihat pada diagram tegangan-regangan sebenarnya pada kondisi plastis hubungan tegangan-regangan dapat dirumuskan dengan :

$$\sigma = K.\varepsilon^n$$ (Kalpakjian, 2008)

Dimana σ = Tegangan (Pascal)

K = Konstanta penguatan

ε = Regangan

n = *eksponensial strain hardening*

Dalam analisa untuk mendapatkan penyelesaian masalah deformasi, maka perlu mengidealisasikan hubungan antara tegangan-regangan yang terjadi. Pada umumnya ada empat pemodelan pengidealisasian dari sudut pandang terjadinya deformasi pada material, yang pertama adalah *rigid perfectly plastic*, pada pemodelan ini material tidak mengalami deformasi elastis terlebih dahulu, namun langsung mengalami deformasi plastis pada saat diberi pembebanan sampai batas tertentu. Deformasi akan terus terjadi jika pembebanan terus dilakukan walaupun besar pembebanan tidak dinaikkan. Pada kurva diagram tegangan-regangan pemodelan material ini dapat dilihat pada Gambar 2.3 Pemodelan yang kedua adalah *rigid linear strain hardening*, yaitu pemodelan material yang tanpa mengalami deformasi elastis sehingga hanya terjadi deformasi plastis dan pada saat penambahan deformasi plastis maka akan diikuti oleh penambahan pembebanan secara linier diagram tegangan-regangan.

Untuk material logam sendiri biasanya tergolong material yang *elastroplastic*, yang dimana pada material terjadi dua macam deformasi elastis dan deformasi plastis. Pada material jenis ini pemodelan yang digunakan adalah jenis ketiga dan keempat, yaitu *elastic perfectly plastic* dan *elastis linier strain hardening*. Pada pemodelan ini material akan mengalami deformasi elastis terlebih dahulu selama diberi pembebanan sampai batas tertentu, kemudian akan mengalami deformasi plastis. Untuk *elastis perfectly plastic*, deformasi plastis yang terjadi tidak diikuti penguatan tegangan sedangkan *elastis linier strain hardening*, deformasi plastis yang terjadi akan diikuti dengan penguatan tegangan.

2.4 Defleksi

Defleksi adalah perubahan bentuk pada balok dalam arah-y akibat adanya pembebanan vertikal yang diberikan pada balok atau batang. Sumbu sebuah batang akan terdeteksi dari kedudukannya semula bila benda dibawah pengaruh gaya terpakai. Dengan kata lain suatu batang akan mengalami pembebanan transversal baik itu beban terpusat maupun terbagi merata akan mengalami defleksi. Hal-hal yang mempengaruhi terjadinya defleksi yaitu :

1. Kekakuan batang

   Semakin kaku suatu batang maka lendutan batang yang akan terjadi pada batang akan semakin kecil

2. Besarnya kecil gaya yang diberikan

   Besar-kecilnya gaya yang diberikan pada batang berbanding lurus dengan besarnya defleksi yang terjadi. Dengan kata lain semakin besar beban yang dialami batang maka defleksi yang terjadi pun semakin kecil

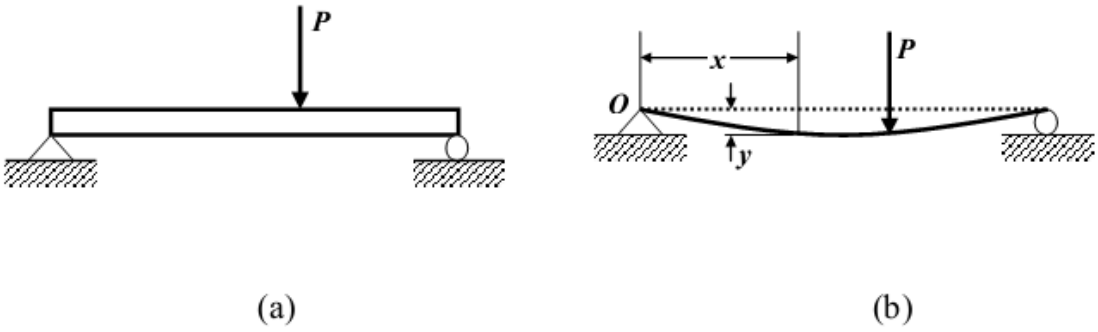
3. Jenis tumpuan yang diberikan

   Jumlah reaksi dan arah pada tiap jenis tumpuan berbeda-beda. Jika karena itu besarnya defleksi pada penggunaan tumpuan yang berbeda-beda tidaklah sama. Semakin banyak reaksi dari tumpuan yang melawan gaya dari beban maka defleksi yang terjadi pada tumpuan rol lebih besar dari tumpuan pin (pasak) dan defleksi yang terjadi pada tumpuan pin lebih besar dari tumpuan jepit.

4. Jenis beban yang terjadi pada batang

   Beban terdistribusi merata dengan beban titik,keduanya memiliki kurva defleksi yang berbeda-beda. Pada beban terdistribusi merata slope yang terjadi pada bagian batang yang paling dekat lebih besar dari slope titik. Ini karena sepanjang

batang mengalami beban sedangkan pada beban titik hanya terjadi pada beban titik tertentu saja.



Gambar 2.8 (a) Balok sebelum terdeformasi dan (b) Balok dalam konfigurasi terdeformasi
Sumber : *http://bambangpurwantara.staff.ugm.ac.id/KekuatanBahan*

Secara matematis, dapat dihitung dengan cara sebagai berikut :

$$\delta = \int_0^l \frac{M_x \, {}^{\partial M}/_{\partial P}}{EI_x} d_x \qquad (ewahyuni, 2010)$$

Dimana :

∂ = besar defleksi batang yang terjadi

M_x = pesamaan momen akibat beban yang ada

${}^{\partial M}/_{\partial P}$ = persamaan momen akibat beban unit

E = modulus elastsitas bahan

I_x = momen inersia penampang

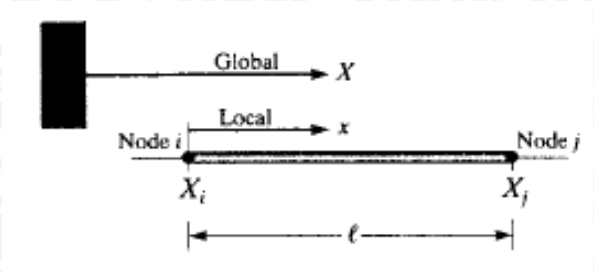
2.5 Metode Elemen Hingga

2.5.1 Sistem Koordinat

Sistem koordinat dalam analisis dengan metode elemen hingga dibagi menjadi tiga macam, yaitu:

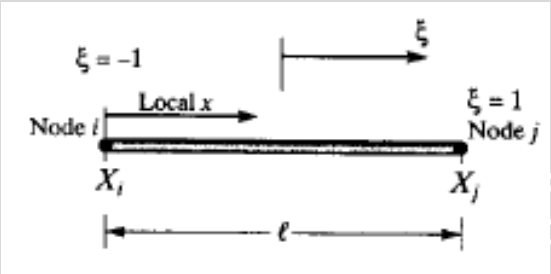
a. Sistem koordinat global adalah kerangka dari acuan untuk bagian keseluruhan. Semua titik diletakkan pada penggunaan jarak sistem koordinat global, hanya ada satu sistem global dalam sebuah analisa khusus seperti pada gambar 2.8

b. Sistem koordinat lokal adalah pendekatan terhadap elemen. Orientasinya relatif terhadap elemen yang tidak mempedulikan perubahan dari orientasi relatif elemen ke sistem global. Dapat dijelaskan seperti pada gambar 2.8



Gambar 2.9 Hubungan sistem koordinat global dengan koordinat lokal elemen.
Sumber : Moaveni, 1999 : 131

c. Sistem koordinat alamiah (natural). Sistem ini terdiri dari koordinat dimensi yang letaknya ditandai pada elemen tanpa memperdulikan ukuran atau bentuk elemennya seperti pada gambar 2.9



Gambar 2.10 Hubungan sistem koordinat lokal dengan koordinat natural elemen.
Sumber : Moaveni, 1999 : 132

2.5.2 Prosedur Perhitungan Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan-permasalahan fisika dengan persamaan differensial. Berikut ini diuraikan langkah-langkah dari perhitungan dengan menggunakan metode elemen hingga. Prosedur perhitungan dengan Metode Elemen Hingga antara lain sebagai berikut.

1. Diskritisasi dan pemilihan elemen

   Proses pembagian struktur menjadi elemen-elemen kecil yang lebih sederhana yang dihubungkan pada titik simpul (*node*), kemudian dilakukan pemilihan elemen seperti model awal dari struktur. Hal ini dilakukan untuk mempermudah analisis.

2. Memilih fungsi pendekatan

Variasi perpindahan pada suatu elemen didekati dengan fungsi interpolasi yang didasarkan pada harga simpul yang mengitari. Fungsi yang paling umum digunakan adalah polinomial.

3. Menurunkan persamaan matrik kekakuan [k]

Dengan prinsip usaha *virtual* akan dihasilkan persamaan matrik kekakuan elemen yang dinyatakan sebagai berikut :

$$[k] = \int [B]^T [C]\,[B]\,dV \qquad \text{(Grandin, 1986)}$$

dimana:

[k] = matrik kekakuan elemen

[B] = matrik konstitutif hubungan regangan dan perpindahan

[C] = matrik konstitutif hubungan tegangan dan regangan material

V = volume

4. Menghitung matrik beban total

Beban yang bekerja didefinisikan menjadi 3 macam, sehingga beban total adalah :

$$F = Q_{NF} + Q_{BF} + Q_T \qquad \text{(Grandin, 1986)}$$

dimana:

Q_{NF} = beban pada konsentrasi nodal

Q_{BF} = beban *body force* (akibat beban sendiri)

Q_T = beban traksi (*surface traction*)

5. Merakit elemen menjadi struktur

Perakitan persamaan elemen akan dibawa ke bentuk persamaan global, yang prosesnya harus memenuhi sifat konvergen dan sifat sinambung. Salah satunya antara lain : titik-titik yang semula bersebelahan harus tetap bersebelahan satu sama lain setelah elemen dikenai beban. Bentuk persamaan global elemen yaitu :

$$[K]\{q\} = \{R\} \qquad \text{(Grandin, 1986)}$$

dimana:

[K] : matrik kekakuan elemen.

{q} : vektor perpindahan simpul.

{R} : matrik beban total.

Setelah matrik kekakuan global diperoleh dan syarat-syarat batasnya dimasukkan maka perpindahan simpul (q) dapat dicari. Suatu syarat batas memberikan informasi bagaimana struktur ditopang dalam ruang, dengan memasukkan nilai perpindahan yang telah ditetapkan sesuai kondisi pada struktur.

6. Mendapatkan perpindahan global

Persamaan global yang telah mendapatkan syarat batas, merupakan sekumpulan persamaan linier yang secara umum dapat ditulis sebagai berikut :

$$k_{1.1}q_1 + k_{1.2}q_2 + \dots\dots\dots\dots\dots + k_{1.n}q_n = R_1$$
$$k_{2.1}q_1 + k_{2.2}q_2 + \dots\dots\dots\dots\dots + k_{2.n}q_n = R_2$$
$$k_{n.1}q_1 + k_{n.2}q_2 + \dots\dots\dots\dots\dots + k_{n.n}q_n = R_n$$

(Grandin, 1986)

Persamaan di atas akan diselesaikan dengan cara eliminasi Gauss untuk mendapatkan besaran-besaran primer yaitu q_1, q_2, q_3 ..... q_n.

7. Mendapatkan besaran sekunder dan interpretasi hasil

Dari besaran pertamanya yang berupa perpindahan, dapat dicari besaran sekunder yang dapat berupa tegangan maupun regangan, dengan menggunakan hubungan antara keduanya. Hubungan tegangan-regangan pada kondisi 3D dapat dinyatakan dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix}$$

(Grandin, 1986)

Hubungan tersebut dapat ditulis dalam bentuk simbol berikut :

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\} \qquad \text{(Grandin, 1986)}$$

Hubungan regangan dengan perpindahan adalah :

$$\{\varepsilon\} = [B]\{d\} \qquad \text{(Grandin, 1986)}$$

Sehingga tegangan dapat dirumuskan sebagai :

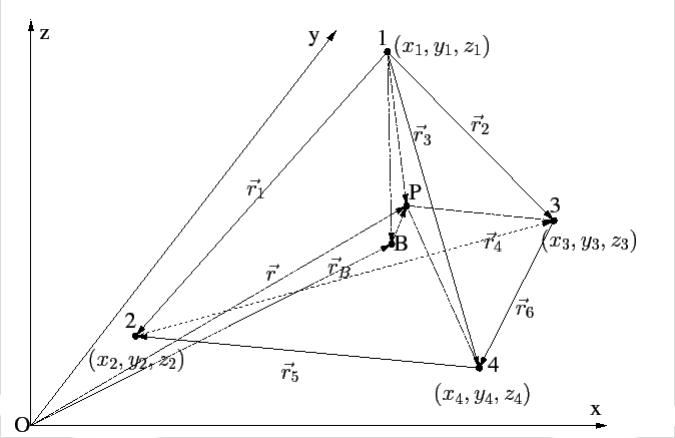
$$\{\sigma\} = [C][B]\{d\} \qquad \text{(Grandin, 1986)}$$

Hasil akhir dari perhitungan dengan metode elemen hingga ini berupa harga distribusi tegangan yang akan diplot di sepanjang struktur untuk dianalisis sesuai dengan rumusan masalah yang ada.

2.5.3 Tipe Elemen untuk Analisis Tiga Dimensi

Analisis elemen hingga pada dasarnya dikembangkan untuk kondisi 2-D. Struktur 3-D menyebabkan penambahan persamaan berganda dalam jumlah besar, tetapi dengan menggunakan elemen dengan orde lebih tinggi dan komputer yang lebih cepat, maka masalah tersebut dapat diatasi.

Elemen *tetrahedral* didefinisikan dalam tiga sumbu koordinat, x, y, z, sehingga memiliki tiga komponen perpindahan yaitu u, v, w. Skema elemen *tetrahedral* dalam sumbu koordinat dapat dilihat pada gambar 2.10 di bawah ini.



Gambar 2.11 Elemen *Tetrahedral*
Sumber : Nentchev , 1997 : 21

Fungsi untuk tiap titik pada elemen tetrahedron adalah :

$$u = L_1u_1 + L_2u_2 + L_3u_3 + (1 - (L_1 + L_2 + L_3)u_4$$

$$v = L_1v_1 + L_2v_2 + L_3v_3 + (1 - (L_1 + L_2 + L_3)v_4$$

$$w = L_1w_1 + L_2w_2 + L_3w_3 + (1 - (L_1 + L_2 + L_3)w_4$$ (Grandin, 1986)

$$x = L_1x_1 + L_2x_2 + L_3x_3 + (1 - (L_1 + L_2 + L_3)x_4$$

$$y = L_1y_1 + L_2y_2 + L_3y_3 + (1 - (L_1 + L_2 + L_3)y_4$$

$$z = L_1z_1 + L_2z_2 + L_3z_3 + (1 - (L_1 + L_2 + L_3)z_4$$

Kemudian disusun dalam matrik yang untuk mendefinisikan [N] matrik

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 & L_2 & 0 & 0 & L_3 & 0 & 0 & L_4 & 0 & 0 \\ 0 & L_1 & 0 & 0 & L_2 & 0 & 0 & L_3 & 0 & 0 & L_4 & 0 \\ 0 & 0 & L_1 & 0 & 0 & L_2 & 0 & 0 & L_3 & 0 & 0 & L_4 \end{bmatrix} \{q\}$$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = [N]\{q\}$$ (Grandin, 1986)

Dimana $\{q\} = [u_1\ v_1\ w_1\ u_2\ v_2\ w_2\ u_3\ v_3\ w_3\ u_4\ v_4\ w_4]^T$

Kemudian perlu diketahui jarak perpindahan dari tiap node yang telah memiliki koordinat tersebut. Namun dalam mengetahui perpindahan tersebut menggunakan cara deriatif dari fungsi perpindahan dan koordinat dengan meninjau pada koordinat natural. Secara umum persamaan yang digunakan adalah :

$$\frac{\partial_u}{\partial L_1} = \frac{\partial_u}{\partial_X}\frac{\partial_x}{\partial L_1} + \frac{\partial_u}{\partial_y}\frac{\partial_y}{\partial L_1} + \frac{\partial_u}{\partial_z}\frac{\partial_z}{\partial L_1}$$

$$\frac{\partial_u}{\partial L_2} = \frac{\partial_u}{\partial_X}\frac{\partial_x}{\partial L_2} + \frac{\partial_u}{\partial_y}\frac{\partial_y}{\partial L_2} + \frac{\partial_u}{\partial_z}\frac{\partial_z}{\partial L_2}$$ (Grandin, 1986)

$$\frac{\partial_u}{\partial L_3} = \frac{\partial_u}{\partial_X}\frac{\partial_x}{\partial L_3} + \frac{\partial_u}{\partial_y}\frac{\partial_y}{\partial L_3} + \frac{\partial_u}{\partial_z}\frac{\partial_z}{\partial L_3}$$

Dengan demikian didapatkan persamaan yaitu :

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial_u}{\partial_X} \\ \frac{\partial_u}{\partial_y} \\ \frac{\partial_u}{\partial_z} \end{pmatrix} = \frac{1}{|J|} \begin{bmatrix} a_1 a_2 a_3 a_4 \\ b_1 b_2 b_3 b_4 \\ c_1 c_2 c_3 c_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix} \qquad \text{(Grandin, 1986)}$$

Apabila dalam deriatif dari displacement *v* dan *w* menggunakan cara yang sama, maka matrik persamaan tersebut dapat dirubah menjadi matrik [B].

$$\{\varepsilon\} = [B]\{d\} \qquad \text{(Grandin, 1986)}$$

Atau

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_x \\ \gamma_y \\ \gamma_z \end{Bmatrix} = \frac{1}{[J]} \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 & a_2 & 0 & 0 & a_3 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & 0 & 0 & b_2 & 0 & 0 & b_3 & 0 \\ 0 & 0 & c_1 & 0 & 0 & c_2 & 0 & 0 & c_3 \\ b_1 & a_1 & 0 & b_2 & a_2 & 0 & b_3 & a_3 & 0 \\ 0 & c_1 & b_1 & 0 & c_2 & b_2 & 0 & c_3 & b_3 \\ c_1 & 0 & a_1 & c_1 & 0 & a_2 & c_3 & 0 & a_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ w_3 \\ u_4 \\ v_4 \\ w_4 \end{Bmatrix} \qquad \text{(Grandin, 1986)}$$

Dimana

$$a_1 = (y_2 - y_4)(z_3 - z_4) - (y_3 - y_4)(z_2 - z_4)$$

$$a_2 = (y_3 - y_4)(z_1 - z_4) - (y_1 - y_4)(z_3 - z_4)$$

$$a_3 = (y_1 - y_4)(z_2 - z_4) - (y_2 - y_4)(z_1 - z_4)$$

$$b_1 = (x_3 - x_4)(z_2 - z_4) - (x_3 - x_4)(z_3 - z_4)$$

$$b_2 = (x_1 - x_4)(z_3 - z_4) - (x_1 - x_4)(z_1 - z_4)$$

$$b_3 = (x_2 - x_4)(z_1 - z_4) - (x_2 - x_4)(z_2 - z_4)$$

$$b_1 = (x_2 - x_4)(y_3 - y_4) - (x_3 - x_4)(y_2 - y_4)$$

$$b_2 = (x_3 - x_4)(y_1 - y_4) - (x_1 - x_4)(y_3 - y_4)$$

$$b_3 = (x_1 - x_4)(y_2 - y_4) - (x_2 - x_4)(y_1 - y_4)$$

$$a_4 = -(a_1 + a_2 + a_3)$$

$$b_4 = -(b_1 + b_2 + b_3)$$

$$c_4 = -(c_1 + c_2 + c_3)$$

$$[J] = (x_1 - x_4)(a_1) + (y_1 - y_4)(b_1) + (z_1 - z_4)(c_1)$$

Dari penjabaran yang telah diberikan sebelumnya, maka untuk mengetahui kekakuan dari elemen tersebut adalah :

$$[k] = [B]^T[C][B]\frac{|J|}{6} \qquad \text{(Grandin, 1986)}$$

2.6 Hipotesis

Dari tinjauan pustaka yang telah didapat, maka muncul hipotesis dari permasalahan yang akan diamati. Besar bukaan sudut belitan, panjang kaki pengait dan diameter bahan dari alat ortodontik mempengaruhi besar energi regangan yang muncul, sehingga *orthodontic force* yang dihasilkan akan berbeda pula.

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode penelitian eksperimental semu, yaitu melakukan studi literatur untuk mencari hubungan sebab akibat dalam suatu proses melalui pengumpulan data dari berbagai sumber, kemudian data tersebut diolah dalam simulasi yang menggunakan *software* berbasis elemen hingga.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Studio Perancangan dan Rekayasa Sistem Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya pada bulan Maret-Mei 2013.

3.3 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

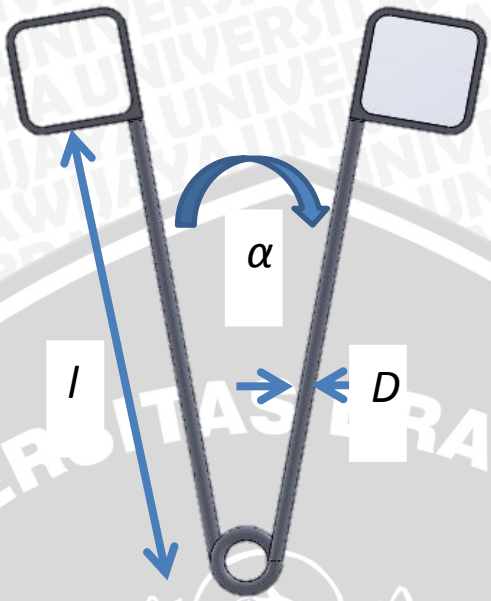
1. Variabel Bebas

   Variabel bebas adalah variabel yang menyebabkan atau memengaruhi, yaitu faktor-faktor yang diukur, dimanipulasi atau dipilih oleh peneliti untuk menentukan hubungan antara fenomena yang diobservasi atau diamati. Variabel bebas dalam penelitian ini dapat dilihat pada skema Gambar 3.1 yaitu:

   a. Variasi bukaan sudut belitan yaitu $10^o \leq \alpha \leq 20^o$

   b. Variasi panjang kaki pengait yaitu 10 mm $\leq l \leq$ 20 mm

   c. Variasi diameter bahan 0.012 inchi $\leq D \leq$ 0.014 inchi



Gambar 3.1 Pemodelan 3 Dimensi alat *orthodontic*
Sumber : *Solidworks Professional 2012*

2. Variabel Terikat

   Variabel terikat adalah variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas yang ditentukan. Nilai dari variabel terikat diketahui setelah melakukan penelitian. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah *Orthodontic Force* pada alat orthodontik sebesar 30 gramforce.

3. Variabel Terkontrol

   Variabel terkontrol adalah variabel yang nilainya dijaga konstan selama penelitian. Variabel terkontrol dalam penelitian ini adalah:

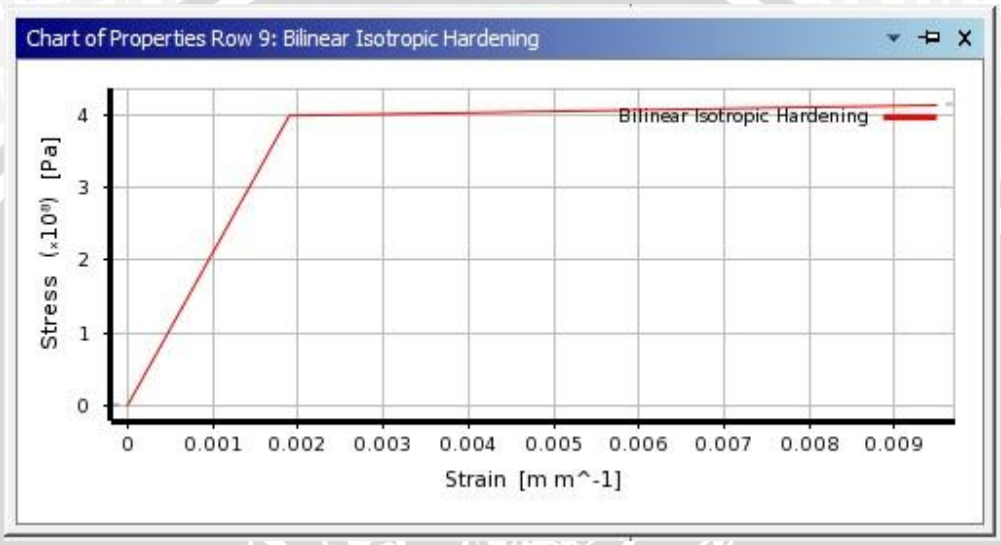
   - *Properties* material yang digunakan.
   - Geometri alat *orthodontic* selain yang divariasikan pada variabel bebas.

3.4 Bahan dan Peralatan Penelitian

Bahan yang digunakan untuk alat *orthodontic* adalah *stainless steel* SUS304 V. Karakteristik material SUS304 V yang akan disimulasikan adalah sebagai berikut :

- Modulus Elastisitas Bahan (E) = 196500,5745 MPa
- Angka poisson (v) = 0,3
- Tegangan Yield (σ_y) = 196,5 GPa
- Tangent Modulus = 1900,53 MPa
- Densitas = 7916.5 kg/m^3

Pemodelan material SUS304 V dapat ditunjukkan pada Gambar 3.2 di bawah ini.

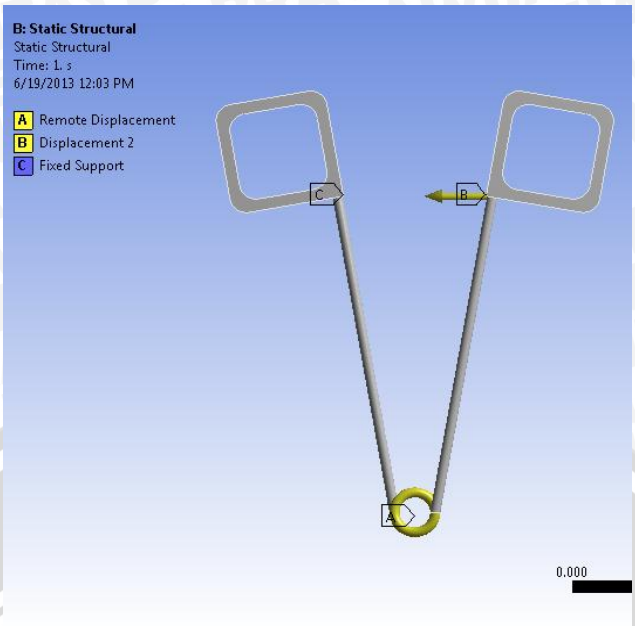


Gambar 3.2 Pemodelan material pada material SUS304V
Sumber : *Ansys Workbench ver.14.5*

3.6 Prosedur Penelitian

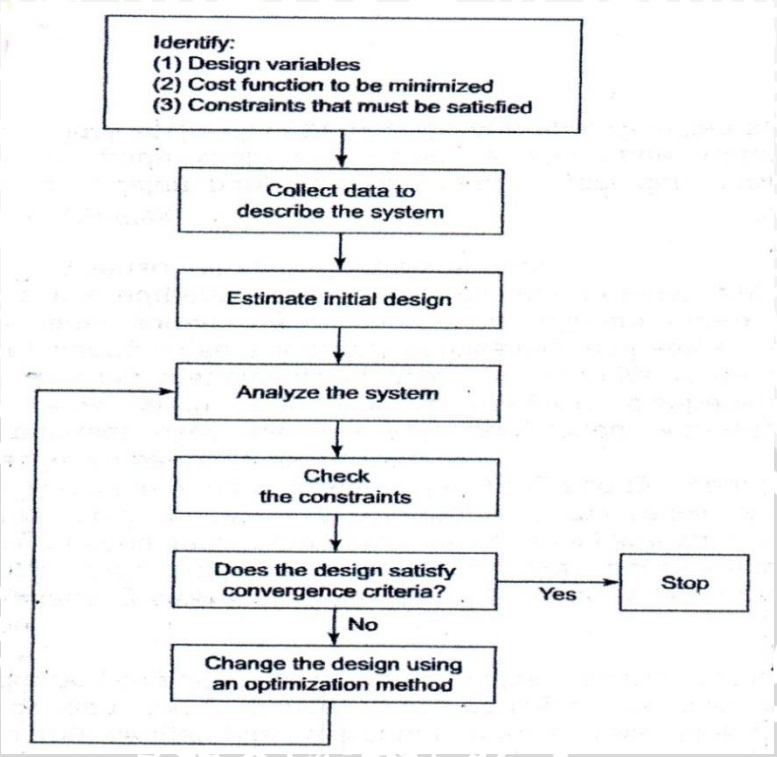
Dalam percobaan, prosedur penelitian dilakukan dengan urutan sebagai berikut:

1. Memodelkan alat *orthodontic* dengan ukuran bentuk sesuai dengan batas-batas yang diinginkan. Untuk awal pemodelan ukuran menggunakan batas ukuran terendah.
2. Model alat diberikan model beban *dispacement* yaitu pada salah satu pengait yang berbentuk kotak sedangkan pengait yang lain ditumpu secara *fixed support* (Gambar 3.3). Deformasi dan *force reaction* yang dihasilkan merupakan hasil yang akan dicari.



Gambar 3.3 Model displacement pada alat yang diujikan
Sumber : *Ansys Workbench ver.14.5*

3. Pada penelitian ini menggunakan teknik optimasi desain sehingga dapat meminimalkan modifikasi yang berulang-ulang (Gambar 3.4).



Gambar 3.4 Alur Perencanaan Desain dan Manufaktur dengan Optimasi Desain
Sumber : Arora, Jasbir. Introduction to Optimum Design - 2 ed. 2004

3.7 Meshing

Meshing adalah proses membagi geometri menjadi elemen-elemen kecil dimana nantinya dihasilkan node-node yang dapat digunakan dalam perhitungan komputasi secara elemen hingga. Semakin kecil elemen yang dibentuk semakin besar pula persamaan yang harus diselesaikan oleh *software* sehingga beban komputer akan semakin besar tetapi hasil yang akan diperoleh juga semakin akurat yang diakibatkan karena node yang dihasilkan sangat banyak. *Meshing* dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu manual dan otomatis. Gambar 3.5 menunjukkan model *meshing* pada benda kerja.

Gambar 3.5 *Meshing* Benda Kerja
Sumber : *Ansys Workbench ver.14.5*

3.8 Langkah-langkah Simulasi pada Software

Proses simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* Ansys 13.0 Workbench dengan analisis secara statis. Langkah-langkah proses simulasi dibagi menjadi 3 tahap, yaitu :

1. *Preprocessing*
2. *Solution*
3. *Postprocessing*

3.8.1 Preprocessing

Pada tahap ini dilakukan pemodelan alat *orthodontic* :

1. *Import* file geometri benda kerja yang sudah dimodelkan dari *software* Solidwork dalam bentuk *file type* (.SLDASM) ke dalam *software* analisis Ansys 13.0 Workbench.
2. Menentukan jenis sistem analisis, dalam hal ini dipilih jenis Static Structural.
3. Memasukkan *material properties* untuk alat *orthodontic.*
4. Melakukan *meshing* pada semua *body* benda kerja.

5. Menentukan besar pembebanan pada pengait (*displacement*) dan tumpuan sesuai prosedur pengujian.

3.8.2 Solution

Pada tahap ini mendefinisikan jenis hasil yang akan ditampilkan yang mengacu kondisi batas sebelumnya. Dalam simulasi ini dipilih :

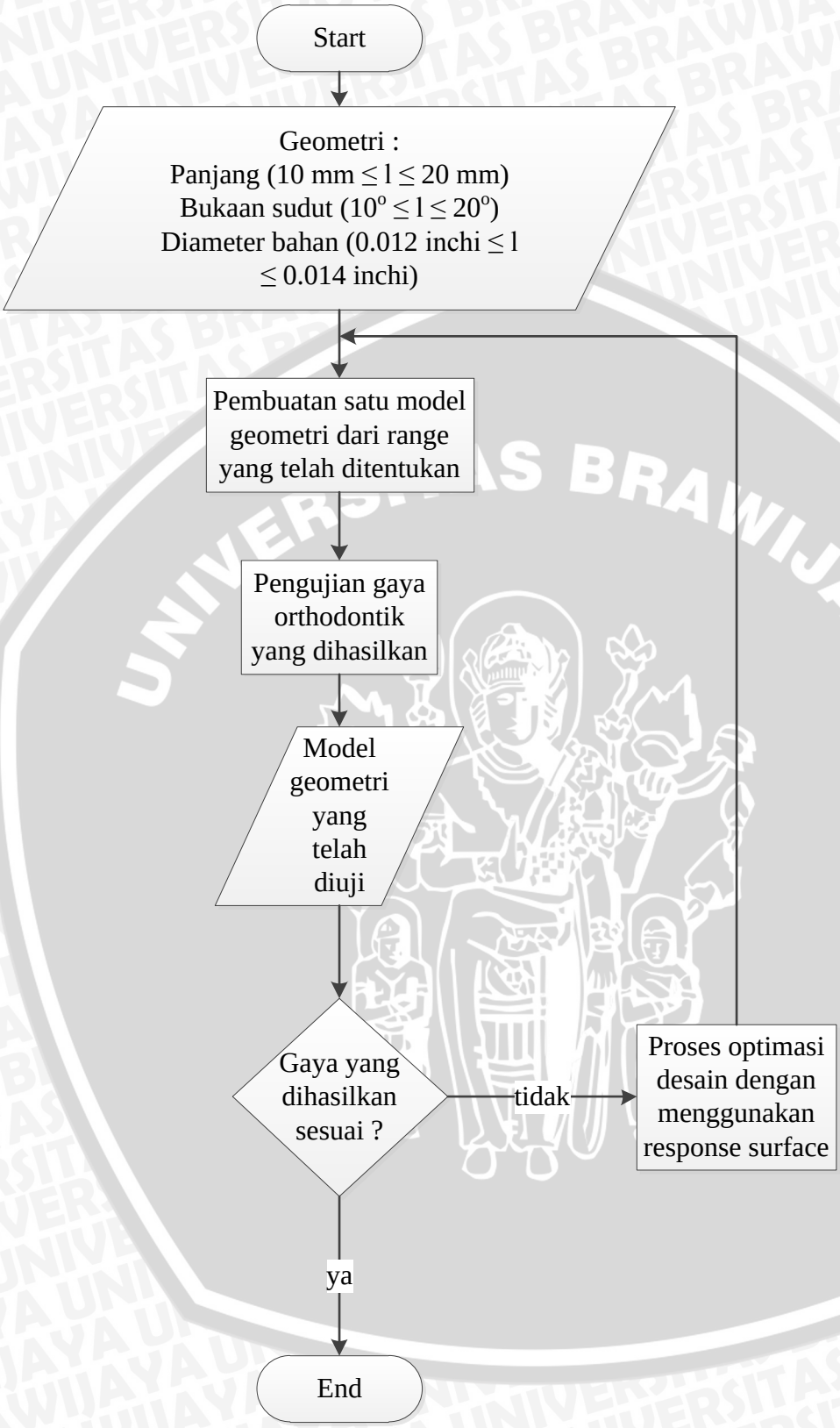
- *Directional Deformation* pada semua *body*.
- *Equivalent Stress* pada semua *body*.
- *Force probe* untuk mengetahui besar gaya *orthodontic* yang dihasilkan.

3.8.3 Postprocessing

Menganalisis hasil dari proses simulasi yang telah dilakukan ke dalam tabel maupun grafik. Dalam penelitian ini dilakukan analisis nilai *force probe* yang dihasilkan oleh alat *orthodontic*. Dari hasil yang muncul nantinya digunakan pada simulasi berikutnya untuk mengetahui optimasi desain yang muncul.

3.9 Alur Penelitian

Alur Penelitian yang akan dilakukan sesuai dengan alur pada Gambar 3.5 dimana nantinya dapat dihasilkan desain yang sesuai dengan kebutuhan yang diinginkan, yaitu alat ortodontik dengan gaya ortodontik yang dihasilkan adalah 30 gf. Alur tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.6



Gambar 3.6 Alur Penelitian Optimasi Desain

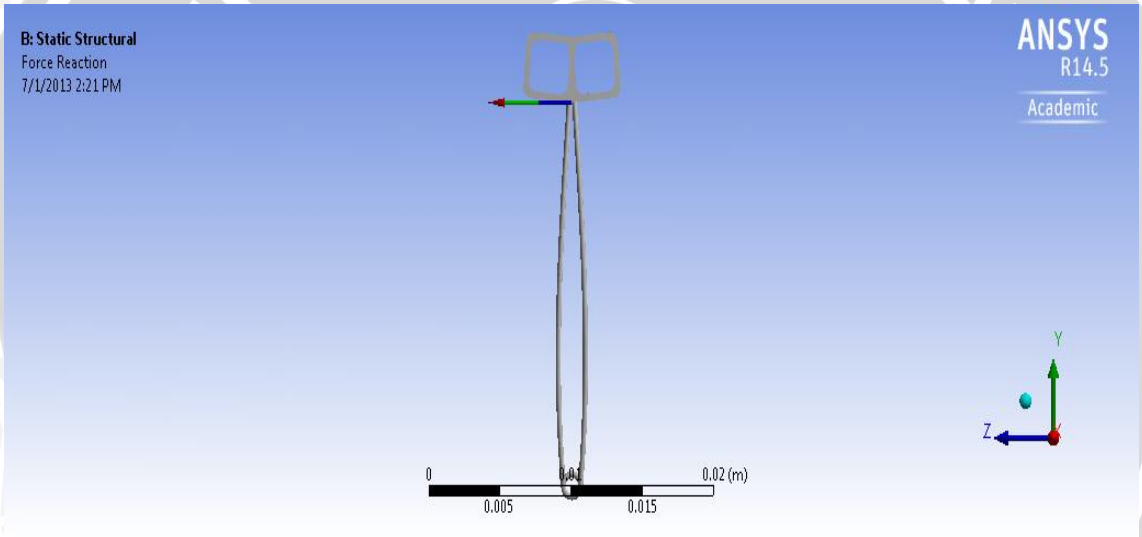
repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Simulasi Pembebanan

Dari gambar 4.1 dapat dilihat hasil dari orthodontic force yang dihasilkan dari salah satu model trial yang telah dibuat. Model yang digunakan sebagai inputan awal adalah model dengan interval batasan tertinggi, yaitu dengan ukuran d = 0.014 inchi, l = 20 mm, dan $\alpha = 20^o$. Setelah diberikan dorongan (*displacement*) dari tiap pengait hingga sampai bertemu dan berhimpit satu sama lain, didapatkan gaya maksimal pada setiap pengait arah sumbu-z adalah 0,16296 N. Hal ini dapat disimpulkan bahwa pada range batas atas yang diberikan tidak memenuhi dari nilai gaya orthodontik yang diinginkan yaitu 30 gf atau sebesar 0,294199 N.



Gambar 4.1 Hasil dari pembebanan yang telah diberikan dari salah satu model trial.
Sumber : Ansys® Workbench 14.5

Akibat dari hasil yang kurang memenuhi target, maka pemodelan dari geometri tersebut harus didesain kembali berulang kali agar menghasilkan gaya orthodontik yang diinginkan. Namun apabila dilakukan secara manual, akan banyak sekali percobaan yang dilakukan atau iterasi desain untuk mendapatkan hasil yang diinginkan sehingga membutuhkan waktu yang banyak pula, serta kemungkinan untuk mendapatkan hasil yang sesuai sangat sulit. Dalam hal ini perlu dilakukan optimasi dengan menggunakan tool optimasi desain pada Ansys®, salah satunya adalah *Goal Driven Optimization*.

Sebelum melakukan optimasi desain, terlebih dahulu parameter-parameter yang dibutuhkan untuk optimasi desain harus diidentifikasikan terlebih dahulu dengan cara mengaktifkan kolom yang berada pada depan parameter. Parameter-parameter yang telah ditentukan sebelumnya hanya menghasilkan satu model desain, dimana desain tersebut telah ditampilkan sebelumnya. Untuk itu perlu diberikan sampel lain dari parameter desain yang nilainya berada pada *range* yang telah ditentukan sebelumnya. Nilai tersebut nantinya dibangkitkan atau dimunculkan dengan mengatur pada *Design of Experiment*. Di dalam *Design of Experiment* ini berguna untuk mengatur batasan-batasan inputan yang sesuai dengan variabel bebas yang telah ditentukan, seperti *range* diameter bahan minimal dan maksimal yang digunakan serta parameter lain yang diperlukan sehingga model yang akan diberikan tetap berada pada *range* yang telah ditentukan.

Tabel 4-1 batas-batas parameter yang dimasukkan dalam *Design of Experiment*

Parameter	Batas Nilai Bawah	Batas Nilai Atas
Panjang Kaki Pengait (mm)	10	20
Sudut Bukaan (^{O})	10	20
Diameter Bahan (mm)	0.3048	0.3556

Jumlah sampel yang dapat diuji dapat didesain dengan menggunakan *Central Composite Design*, dengan membangkitkan nilai dimensi desain dari batasan yang telah diberikan secara acak dan memberikan jumlah sampel yang dirumuskan sesuai rumus 4-1.

Jumlah sampel yang dibutuhkan = $\{(2 * N) + 2^{(N-f)} + 1\}$ … (Ansys Inc, 2009)

Dimana : N = jumlah inputan parameter

f = factorial number (didapatkan dari tabel 4.2)

Hasil dari jumlah sampel yang dibutuhkan untuk diuji *Respone Surface* seperti yang terlihat pada Tabel 4.2. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa sampel yang dimunculkan dari 3 inputan parameter tersebut sebanyak 15 model desain eksperimen.

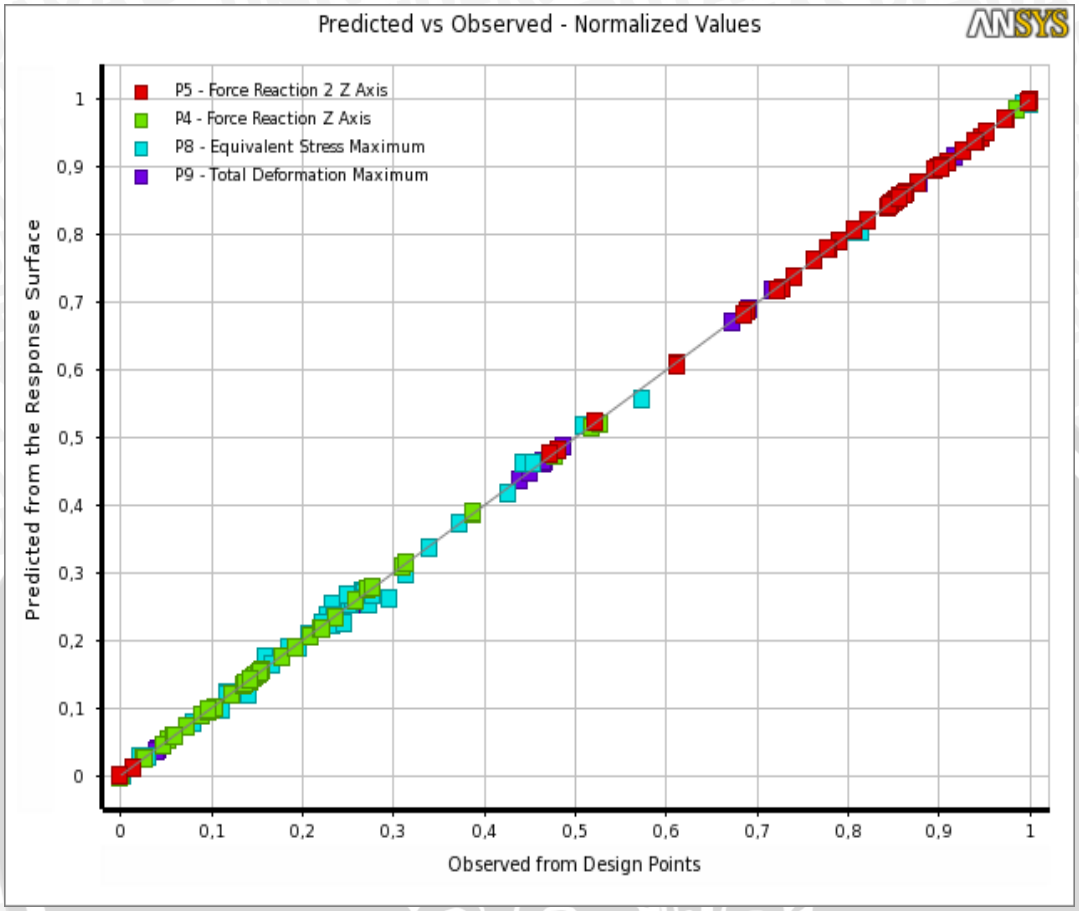
Tabel 4.2 Tabel hubungan input parameter dan *factorial number* terhadap data yang dibangkitkan

Jumlah Inputan Parameter	*Factorial Number* (f)	Jumlah sampel yang dibutuhkan
1	0	5
2	0	9
3	0	15
4	0	25
5	1	27
6	1	45
7	1	79
8	2	81
9	2	147
10	3	149
11	4	151
12	4	281
13	5	283
14	6	285
15	7	287
16	8	289
17	9	291
18	9	549
19	10	551
20	11	553

Metode *Response Surface* yang dipakai adalah *Standart Response Surface-Full-2nd Order Polynomial*. Dapat diartikan bahwa model response surface yang dipakai menggunakan pendekatan grafik polinomial orde dua. Setelah dilakukan pengujian *Response Surface*, maka dihasilkan beberapa informasi yang mendukung dalam melakukan optimasi desain, seperti Grafik Uji Normalitas, *Local Sensitivity Chart, Response Chart, Goodness of Fit*, dan masih ada informasi yang lain yang dapat ditunjukkan oleh hasil tersebut.

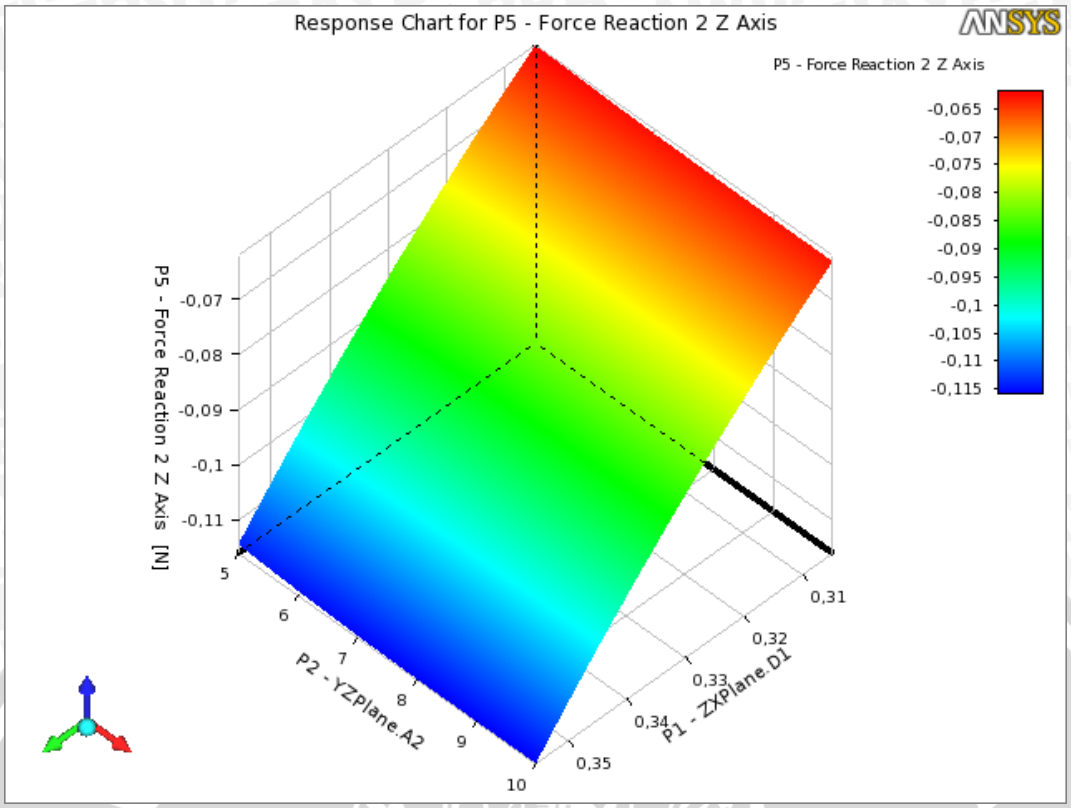
Pada Grafik Uji Normalitas, sampel yang digunakan dalam ekperimen diplot dalam tabel uji normalitas seperti pada berikut (Gambar 4.2). Grafik tersebut memberikan informasi bahwa output hasil ekperimen dari sampel yang telah diuji berada jauh atau mendekati dari garis normalitas. Apabila menjauhi dari garis normalitas maka ada penyimpangan data dari hasil eksperimen, sebaliknya data tersebut tidak ada penyimpangan dari hasil eksperimen. Pada Gambar 4.2 menunjukkan bahwa data hasil eksperimen dari sampel yang diuji mendekati dan hampir sejajar dengan garis normalitas. Hal ini menunjukkan bahwa output yang dihasilkan tidak mengalami

penyimpangan serta pengaruh dan perubahan yang diberikan oleh parameter-parameter yang telah ditentukan sebelumnya benar-benar berpengaruh pada hasil optimasi



Gambar 4.2 Uji Normalitas dari hasil nilai *Design of Experiment* sebelumnya
Sumber : Ansys® Workbench 14.5

Pada *Response Chart* dapat ditunjukkan dalam bentuk 2D atau 3D dengan dibedakan pada jumlah hubungan dari inputan dan outputan yang akan diamati. Untuk tampilan 2D hanya diberikan hubungan satu input dan satu output, sedangkan untuk 3D diberikan hubungan dua input dan satu output. Pada Gambar 4.3 ditunjukkan hubungan dari besar dimensi dari diameter dan sudut bukaan salah satu kaki dengan *force reaction* yang merupakan gaya orthodontik pada salah satu kaki yang merupakan efek dari pembebanan yang diberikan.



Gambar 4.3 Hubungan antara dimensi diameter bahan dan sudut bukaan kaki pengait dengan *force reaction* pada salah satu kaki
Sumber : Ansys® Workbench 14.5

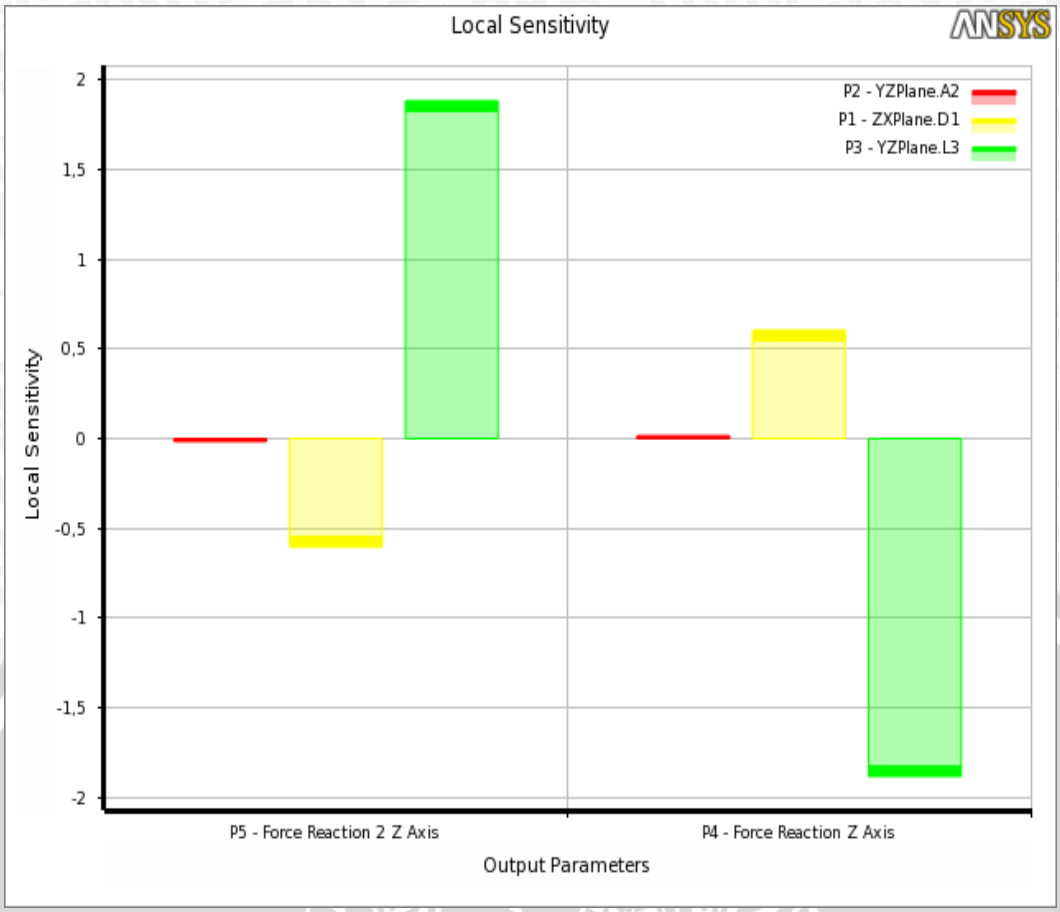
Dari Gambar 4.3 tersebut dapat diamati bahwa semakin meningkatnya pertambahan dari nilai bukaan sudut serta dimensi diameter bahan maka mengakibatkan nilai *force reaction* semakin meningkat pula, begitu pula dengan sebaliknya. *Force reaction* ini sendiri yang nantinya merupakan gaya reaksi sebagai gaya orthodontik. Informasi yang ditampilkan pada grafik ini yaitu semakin besar gaya yang dihasilkan maka nilainya semakin kebawah atau negatif. Hal ini hanya diakibatkan karena arah gaya yang searah pada sumbu-Z negatif dari diagram *cartesius.*

Apabila ditinjau pada kolom *Goodness of Fit,* maka akan muncul informasi statistik dari uji normalitas sebelumnya dimana hal tersebut disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil perhitungan statistik dari pengujian data sampel terhadap output yang ditentukan.

Name	Force Reaction 2 Z Axis	Force Reaction Z Axis	Equivalent Stress Maximum	Total Deformation Maximum	Solid Mass
Coefficient of Determination (Best Value = 1)	0,999940829	0,999940829	0,996406795	0,999992359	0,999997769
Adjusted Coeff of Determination (Best Value = 1)	0,999925257	0,999925257	0,995793321	0,999991268	0,999997254
Maximum Relative Residual (Best Value = 0%)	1,686500057	1,686500234	9,477046521	0,299712374	0,040675441
Root Mean Square Error (Best Value = 0)	0,001517249	0,001517249	36,31815871	0,005628955	7,81E-09
Relative Root Mean Square Error (Best Value = 0%)	0,654265664	0,654265701	3,59609198	0,096912651	0,016408855
Relative Maximum Absolute Error (Best Value = 0%)	2,45460192	2,454601981	16,70214017	0,877716996	0,371085221
Relative Average Absolute Error (Best Value = 0%)	0,525397701	0,5253977	4,412325523	0,204562398	0,124880499

Salah satu yang paling utama adalah pengamatan dari hubungan tiap parameter input dengan output hasil yang diinginkan. Hal tersebut dapat diamati dalam *Local Sensitivity Chart* pada bagian kolom *Response Point*. Chart tersebut ditampilkan dalam bentuk bar atau kolom (Gambar 4.4).



Gambar 4.4 *Local Sensitivity Chart* dari hubungan input dan output yang diinginkan
Sumber : Ansys® Workbench 14.5

Dalam chart tersebut dapat diamati, pada nilai *force reaction Z Axis* akan semakin meningkat apabila dimensi diameter bahan yang digunakan meningkat namun nilainya akan menurun apabila panjang kaki dari pengait semakin meningkat. Hal itu juga dialami pada *force reaction 2 Z Axis* hanya saja karena perbedaan arah sumbu mengakibatkan informasi tanda positif-negatifnya terbalik. Parameter yang memiliki pengaruh terbesar adalah panjang kaki pengait dan kemudian disusul yang kedua adalah dimensi diameter bahan yang digunakan. Untuk sudut yang dibentuk antar kaki pengait tidak memberikan pengaruh yang signifikan, karena parameter yang lebih menonjol diakibatkan karena perubahan dimensi diameter dan panjang kaki pengait.

Hasil dari local sensitivity chart yang ditampilkan sesuai dengan teori defleksi yang terjadi pada teori sebelumnya. Persamaan defleksi yang terjadi pada model tersebut dapat dimodelkan sebagai berikut :

$$\delta = \int_0^l \frac{M_x \, \partial M / \partial P}{EI_x} d_x$$

$$\delta = \int_0^l \frac{Px.x}{EI} d_x$$

$$\delta = \frac{PL^3}{3EI}$$

$$P = \frac{3EI}{\partial PL^3}$$

Dari persamaan tersebut pula membuktikan bahwa local sensitivity chart yang terbentuk sesuai dengan teori castigliano.

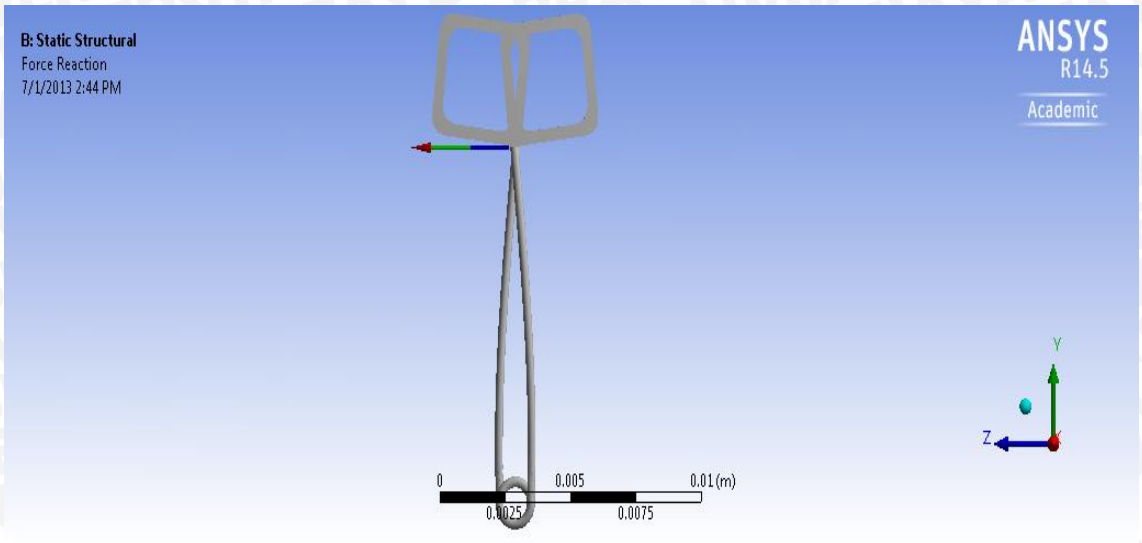
Hasil dari *Response Surface* akan menjadi informasi dalam melakukan optimasi, yaitu berupa nilai perbandingan dari tiap inputan parameter yang saling mempengaruhi tiap inputan desain dan juga output yang diinginkan. Dalam hal ini informasi tersebut dibawa pada optimasi *Goal Driven Optimization* (GDO) agar mendapatkan model dari alat orthodontik yang sesuai dengan kebutuhan, yaitu alat orthodontik yang dapat menghasilkan gaya orthodontik sebesar 30 gf atau sama dengan 0,2942 N. Pada optimasi ini menggunakan metode MOGA (*Multi-Objective Genetic Algorithm*) yang didapatkan tiga kandidat terbaik dalam bentuk geometri yang ditampilkan. Kelebihan dari optimasi menggunakan MOGA sendiri adalah hasil yang nantinya dimunculkan merupakan hasil pendekatan yang lebih detail dari metode secara *default* (*Screening*), mampu dalam menghasilkan optimasi dari parameter yang memiliki nilai secara kontinyu atau berupa range daerah nilai parameter, serta hasil yang ditampilkan dapat mengacu dari output yang lebih dari satu. Nilai-nilai tersebut awalnya ditentukan dengan memberikan syarat model yang diinginkan, seperti gaya orthodontik sebesar 0,2942 N pada setiap kaki serta memberikan batasan maksimal tegangan yang diijinkan saat pembebanan. Dari tiga hal tersebut maka muncul pula tiga kandidat terbaik yang dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil Optimasi desain menggunakan MOGA didapat tiga kandidat terbaik

Nama	Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
Diameter (mm)	0,3048	0,3048	0,3049
Panjang kaki pengait (mm)	10,0003	10,0009	10,0006
Sudut bukaan pengait (^{O})	19.8926	18.7464	17.4144
Force Reaction Z Axis (N)	0,2943	0,2942	0,2942
Solid Mass (g)	0,0388	0,0389	0,0389

Dari hasil yang muncul dapat diamati bahwa hasil tersebut merupakan nilai pendekatan dari target yang diinginkan. Dapat disimpulkan pula bahwa dalam optimasi desain yang dilakukan adalah memberikan nilai terbaik dalam mendesain suatu model, sesuai dengan grafik uji normalitas dan hasil perhitungan statistik yang telah dilakukan. Nilai yang diberikan tidak 100% mendekati sempurna, dimana apabila dalam optimasi memaksakan nilai yang diinginkan sama persis dengan hasil yang dituju, maka grafik sensitivitas dari pengaruh inputan dan output yang dituju tidak muncul. Hal itu dikarenakan bahwa hasil yang diharapkan 100% tidak memiliki error yang ditinjau dari perhitungan sebelumnya.

Dari hasil optimasi didapatkan tiga kandidat terbaik dalam model orthodontik yang menghasilkan gaya orthodontik mendekati nilai target yang diinginkan. Kandidat pertama memberikan gaya orthodontik sebesar 0.2943 N dengan dimensi diameter bahan 0.3048 mm, bukaan sudut 9.9463^{O}, panjang kaki 10.0003 mm serta dengan massa 0.0388 gram. Kandidat kedua memberikan gaya orthodontik sebesar 0.2942 N dengan dimensi diameter bahan 0.3048 mm, bukaan sudut 9.3732^{O}, panjang kaki 10.0009 mm serta dengan massa 0.0389 gram. Kandidat ketiga memberikan gaya orthodontik sebesar 0.2942 N dengan dimensi diameter bahan 0.3049 mm, bukaan sudut 8.7072^{O}, panjang kaki 10.0006 mm serta dengan massa 0.0389. Dari hasil tersebut dapat ditampilkan secara geometri seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Geometri Hasil Optimasi Kandidat Kedua dengan Gaya Orthodontik 0.2942 N
Sumber : Ansys® Workbench 14.5

Namun dalam proses manufaktur, untuk dimensi dalam pembuatan produk yang diinginkan diharapkan memiliki maksimal 2 angka di belakang koma. Selain itu khusus untuk diameter bahan dapat dikonversi dari mm ke inch untuk mengadopsi diameter bahan yang ada di pasaran. Maka dari hal tersebut, nilai-nilai tersebut disederhanakan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Dimensi Geometri Hasil Optimasi Desain untuk Proses Manufaktur

Nama	Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
Diameter (inch)	0.012	0.012	0.012
Panjang kaki pengait (mm)	10,00	10,00	10,00
Sudut bukaan pengait (^{O})	19.9	18.74	17.42

Setelah dimensi dari alat disesuaikan dengan kebutuhan dalam manufaktur, maka nantinya dapat mengakibatkan perubahan nilai dari gaya orthodontik yang dihasilkan. Maka, setiap dimensi yang telah diubah dalam ukuran manufaktur, dianalisa kembali untuk mengamati hasil terbaru. Hasil terbaru tersebut ditampilkan dalam Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil Analisa Gaya Orthodontik Setelah Geometri Bahan Sesuai dengan Kebutuhan Manufaktur

Nama	Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
Diameter (inch)	0.012	0.012	0.012
Panjang kaki pengait (mm)	10,00	10,00	10,00
Sudut bukaan pengait (^{O})	19.9	18.74	17.42
Force Reaction Z Axis (N)	0,2978	0,2692	0,2691
Solid Mass (g)	0,0388	0,0392	0,0388

Dari hasil tersebut pula bahwa gaya orthodontik yang dibutuhkan adalah pada kandidat pertama dikarenakan nilai yang dihasilkan mendekati nilai yang dituju (0.2942 N) meskipun nilai yang dihasilkan lebih besar dari nilai yang dituju. Selisih nilai yang dihasilkan sebesar 0.0036 N. Dapat disimpulkan pula bahwa kandidat pertama layak untuk diproduksi sesuai dengan kebutuhan yang diharapkan.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari optimasi desain yang dilakukan, didapatkan 3 kandidat terbaik dengan gaya yang dihasilkan mendekati 0.2942 N atau sama dengan 30 gramforce. Selanjutnya dilakukan penyesuaian dimensi untuk kebutuhan proses manufaktur, didapatkan bahwa desain optimal dipilih dari kandidat desain pertama dengan dimensi diameter bahan 0,012 inchi, panjang kaki pengait 10 mm, dan sudut bukaan $9{,}95^{O}$.

5.2 Saran

1. Dalam pembuatan geometri di *software*, apabila ada unsur simetri pada pemodelan diharapkan menggunakan fitur simetri. Agar hasil yang diberikan pada hasil optimasi tidak berbeda dari sisi yang satu dengan yang lain.

2. Perlu adanya pengamatan lebih lanjut akibat dari *residual strees* yang diakibatkan karena proses pembuatan alat tersebut.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

DAFTAR PUSTAKA

Arora, Jasbir. 2004. *Introduction to Optimum Design - 2 ed*. USA. Elsevier Academic Press

ASYS, Inc. 2009. *Design Exploration*. Canonsburg USA.

Dewi, Amandia. 2013. Ekspresi Interleukin-1β dan TNF-α pada Jaringan Periodontal Tikus Diabetes yang Diinduksi *Streptozotocin* pada Pergerakan Gigi Secara Orthodonti. Program Pasca Sarjana Fakultas Kedokteran Universitas Brawijaya. Malang

Gere, James M. 2004. *Mechanics of Material 6th Edition.* USA : Brooks/Cole Thomson Learning.

Grandin, Hartley. 1986. *Fundamentals of The Finite Element Method.* New York. Macmillan Publishing Company.

Kilic, Nihat et al. 2010. *Effect of Force Magnitude on Tooth Movement : An Experimental Study In Rabbits*. Department of Orthodontic, Faculty of Dentistry, Ataturk University, Erzurum, Turkey.

Mirzakouchaki et al. 2011. *Effect of psychological stress on orthodontic tooth movement in rats.* Orthodontic Department, Tahriz Medical Sciences University, Tahriz, Iran.

Moaveni, Saeed. 1999. *Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS*. New Jersey : Prentice Hall.

Montgomery, Douglas C. 2001. *Design and Analysis of Experiments.* United State of America. John Wiley and Sons.

Nentchev, A. 2002. *Numerical Analysis and Simulation in Microelectronics by Vector Finite Elements*. USA

Robert D. Cook, David S. Malkus dan Michael E. Plesha. 1989. *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. Canada : Wiley.

Timoshenko, SP. & Goodier, JN. 1986. *Teori Elastisitas.* Alih bahasa oleh Darwin Sebayang. Jakarta : Erlangga.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA