

**PENGARUH KETEBALAN DAN *DIAMETER* DALAM *WAVE SPRING*
PADA SOL SEPATU *SPORT* TERHADAP PENYERAPAN BEBAN KEJUT**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONSTRUKSI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

**REDYARSA DHARMA BINTARA
NIM. 105060200111010-62**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2015**

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH KETEBALAN DAN *DIAMETER* DALAM *WAVE SPRING* PADA SOL
SEPATU *SPORT* TERHADAP PENYERAPAN BEBAN KEJUT**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONSTRUKSI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

**REDYARSA DHARMA BINTARA
NIM. 105060200111010-62**

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dr.Eng. Moch. Agus Choiron, ST., MT.
NIP. 19720817 200002 1 001

Dosen Pembimbing II

Dr.Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng.
NIP. 19710310 199802 1 001

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH KETEBALAN DAN *DIAMETER* DALAM *WAVE SPRING* PADA SOL SEPATU *SPORT* TERHADAP PENYERAPAN BEBAN KEJUT

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONSTRUKSI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

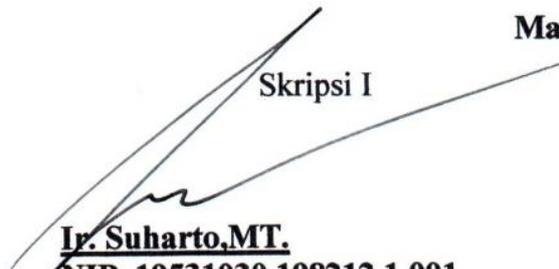
Disusun oleh :

**REDYARSA DHARMA BINTARA
NIM. 105060200111010-62**

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 06 Januari 2015

Majelis Penguji

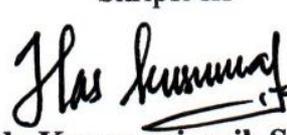
Skripsi I


Ir. Suharto, MT.
NIP. 19531030 198212 1 001

Skripsi II


Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP. 19740930 200012 1 001

Skripsi III


Haslinda Kusumaningsih, ST., M. Eng.
NIK. 201405 890102 1 2 001

Mengetahui,
Ketua Program Studi S1




Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT.
NIP. 19750802 199903 2 002

PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas berkat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan studi di Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini dapat terselesaikan berkat bantuan, petunjuk dan bimbingan dari berbagai pihak yang telah banyak membantu proses penyelesaian tugas akhir ini, oleh karena itu tak lupa penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr.Eng. Nurkholis Hamidi,ST.,M.Eng. selaku ketua jurusan Teknik Mesin dan bapak Purnami,ST.,MT. selaku sekretaris jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah membantu kelancaran proses administrasi tugas akhir ini.
2. Bapak Dr.Eng. Moch. Agus Choiron,ST.,MT selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan bimbingan dan arahan penelitian dan penulisan tugas akhir ini.
3. Bapak Dr.Eng. Anindito Purnowidodo,ST.,M.Eng selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan bimbingan dan arahan untuk kesempurnaan penelitian dan penulisan tugas akhir ini.
4. Kedua orang tua dan keluarga saya yang selalu memberi motivasi dalam pengerjaan penelitian ini.
5. Seluruh Asisten Studio Perancangan dan Rekayasa Sistem (SPRS) yang telah banyak memberi masukan dan dukungan terhadap penulisan tugas akhir ini.
6. Seluruh pihak dan teman-teman yang telah membantu menyelesaikan tugas akhir ini baik secara langsung maupun tidak langsung

Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca sekaligus dapat menjadi bahan acuan untuk penelitian lebih lanjut.

Malang, Januari 2015

Penulis



DAFTAR ISI

	halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR LAMPIRAN	vii
DAFTAR SIMBOL	viii
RINGKASAN	ix
SUMMARY	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Manfaat.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Penelitian Sebelumnya	3
2.2 Sepatu <i>Sport</i>	4
2.2.1 Susunan Komponen Penyusun Sepatu	5
2.3 <i>Wave Spring</i>	5
2.3.1 Tinjauan Umum <i>Wave Spring</i>	5
2.3.2 Jenis–Jenis <i>Wave Spring</i>	6
2.3.2.1 <i>Wave Spring</i> Putaran Tunggal (<i>Single Turn</i>).....	6
2.3.2.2 <i>Wave Spring</i> Putaran Banyak (<i>Multiple Turn</i>) / <i>Spirawave</i>	6
2.3.3 Lingkup Kerja <i>Wave Spring</i>	8
2.3.4 Istilah-Istilah Dalam <i>Wave Spring</i>	9
2.3.5 Aplikasi <i>Wave Spring</i>	10
2.4 Energi Regangan (<i>Strain Energy</i>)	12
2.5 Energi Yang Diserap Sol Sepatu <i>Sport</i>	13
2.6 Beban <i>Impact</i>	14
2.7 <i>Impuls</i> dan <i>Momentum</i>	15
2.8 Analisa Tegangan dan Regangan	15
2.8.1 Defleksi.....	16

2.8.2	Beban <i>Bending</i>	17
2.8.3	<i>Moment of Inertia</i>	18
2.8.4	Tegangan Pada <i>Wave Spring</i>	19
2.8.5	Defleksi Pada <i>Wave Spring</i>	19
2.9	Metode Elemen Hingga.....	20
2.10	Hipotesis.....	23
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		24
3.1	Metode Penelitian.....	24
3.2	Tempat dan Waktu Penelitian	24
3.3	Variabel Penelitian	24
3.4	Bahan dan Peralatan Penelitian	25
3.4.1	Pemodelan Beban	27
3.5	Prosedur Penelitian.....	28
3.6	<i>Meshing</i>	29
3.7	Langkah-langkah Simulasi pada <i>Software ANSYS 14.5 Academic</i>	30
3.7.1	<i>Pre-processing</i>	30
3.7.2	<i>Solution</i>	31
3.7.3	<i>Post-processing</i>	31
3.8	Alur penelitian.....	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		33
4.1	Verifikasi Pengujian Tekan <i>Wave Spring</i> Dengan Perhitungan Teoritis	33
4.2	Verifikasi Pengujian Model 1 (Model tanpa <i>Wave Spring</i>) Dengan Penelitian Jin-Rae Cho, <i>et all</i> (2009).	35
4.3	Pengaruh Ketebalan dan <i>Diameter</i> Dalam <i>Wave Spring</i> Terhadap Besar Penyerapan Energi Sol Sepatu <i>Sport</i>	37
4.4	Pengaruh Ketebalan <i>Wave Spring</i> Terhadap Penyerapan Energi Pada Variasi Model.....	44
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		47
6.1	Kesimpulan.....	47
6.2	Saran.....	47
DAFTAR PUSTAKA.....		xi
LAMPIRAN		

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1.	Faktor Perkalian Gelombang (K) Pada <i>Wave Spring</i>	10
Tabel 3.1.	Material Properti <i>Wave Spring</i>	26
Tabel 3.2.	Variasi Pemodelan <i>Wave Spring Type Gap</i>	27
Tabel 3.3.	Properti Material <i>Bone, Tissue, Insole, Midsole, Upper</i> dan <i>Ground</i>	27
Tabel 3.4.	Properti Material <i>Outsole (Rubber)</i>	27
Tabel 4.1.	Informasi Geometri dan Properti Material Pegas	33
Tabel 4.2.	Variasi Pembebanan	33
Tabel 4.3.	Hasil Perhitungan Defleksi <i>Wave Spring</i>	34
Tabel 4.4.	Nilai Penyerapan Energi pada Variasi Model	39



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Model pembebanan sol sepatu	3
Gambar 2.2	Grafik hubungan gaya reaksi dan waktu pembebanan	3
Gambar 2.3	Contoh sepatu <i>running</i>	4
Gambar 2.4	Contoh sepatu voli	4
Gambar 2.5	Contoh sepatu <i>basket</i>	5
Gambar 2.6	Komponen penyusun sepatu	5
Gambar 2.7	<i>Wave spring</i> putaran tunggal (a) tipe <i>gap</i> (b) tipe <i>overlap</i>	6
Gambar 2.8	<i>Wave spring</i> tipe <i>spirawave nested</i>	7
Gambar 2.9	<i>Wave spring</i> tipe <i>spirawave crest-to-crest</i>	7
Gambar 2.10	Perbandingan <i>wave spring</i> dengan <i>coil spring</i>	8
Gambar 2.11	Ruang kerja <i>wave spring</i>	8
Gambar 2.12	Pembebanan pada <i>wave spring</i>	8
Gambar 2.13	Istilah pada <i>wave spring</i> tipe <i>gap</i>	9
Gambar 2.14	Istilah pada <i>wave spring</i> tipe <i>crest-to-crest</i>	9
Gambar 2.15	Istilah pada <i>wave spring</i> tipe <i>nested</i>	9
Gambar 2.16	Aplikasi <i>wave spring</i> pada <i>bearing pre-load</i>	11
Gambar 2.17	Aplikasi <i>wave spring</i> pada <i>flow valve</i>	11
Gambar 2.18	Aplikasi <i>wave spring</i> pada <i>quick disconnect</i>	12
Gambar 2.19	Beban aksial pada batang	12
Gambar 2.20	Grafik hubungan deformasi dan beban	12
Gambar 2.21	Beban <i>impact</i> pada batang	14
Gambar 2.22	Batang dengan beban aksial	16
Gambar 2.23	Pertambahan panjang pada batang dengan beban aksial	17
Gambar 2.24	Distribusi tegangan akibat beban <i>bending</i>	18
Gambar 2.25	Penampang bujur sangkar	18
Gambar 2.26	Karakteristik defleksi <i>wave spring</i>	20
Gambar 3.1	Susunan sol sepatu dengan penambahan <i>wave spring</i>	25
Gambar 3.2	Dimensi model uji	26
Gambar 3.3	Dimensi <i>wave spring</i>	27
Gambar 3.4	Model pembebanan pada sol sepatu	28
Gambar 3.5	Lokasi pengambilan data gaya reaksi	29

Gambar 3.6 Lokasi pengambilan data deformasi	29
Gambar 3.7 Bentuk <i>meshing</i> model uji	30
Gambar 3.8 <i>Flowchart</i> pengujian pemodelan sol sepatu	32
Gambar 4.1 Deformasi <i>wave spring</i> pada arah sumbu Y	34
Gambar 4.2 Grafik hubungan pengaruh pembebanan terhadap defleksi <i>wave spring</i>	35
Gambar 4.3 Grafik hubungan gaya reaksi dan waktu pembebanan	36
Gambar 4.4 Grafik hubungan gaya reaksi terhadap deformasi pada model 1	37
Gambar 4.5 Grafik hubungan penyerapan energi terhadap variasi <i>diameter</i> dalam <i>wave spring</i>	39
Gambar 4.6 Deformasi <i>wave spring</i> berlawanan arah sumbu Y (-Y) model 2,5 dan 8	41
Gambar 4.7 Deformasi <i>midsole</i> berlawanan arah sumbu Y (-Y) model 2,5 dan 8	42
Gambar 4.8 Grafik hubungan penyerapan energi terhadap variasi ketebalan <i>wave spring</i>	42
Gambar 4.9 Ketidak merataan pembebanan <i>wave spring</i>	44
Gambar 4.10 Deformasi <i>midsole</i> berlawanan arah sumbu Y (-Y) model 2,3 dan 4	44
Gambar 4.11 Grafik hubungan penyerapan energy terhadap variasi ketebalan dan <i>diameter</i> dalam <i>wave spring</i>	45
Gambar 4.12 Geometri <i>midsole</i> pada variasi model 1 dan model <i>midsole</i> dengan ruang kerja <i>wave spring</i>	45

DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
Lampiran 1.	Deformasi pengujian tekan <i>wave spring</i> dengan metode simulasi	48



DAFTAR SIMBOL

Besaran dasar	Satuan dan Singkatannya	Simbol
Defleksi	Meter atau m	f
Garis tengah	Meter atau m	D
Gaya	Newton atau N	F
Luas area	Meter persegi atau m^2	A
Massa	Kilogram atau kg	m
Modulus elastisitas	Pascal atau Pa	E
Moment of Inertia	Meter pangkat empat atau m^4	I
Panjang	Meter atau m	L
Pertambahan panjang	Delta atau m	δ
Stress / tegangan	Pascal atau Pa	σ
Usaha	Joule atau J	U
Volume	Meter kubik atau m^3	V
Waktu	Detik atau s	t



RINGKASAN

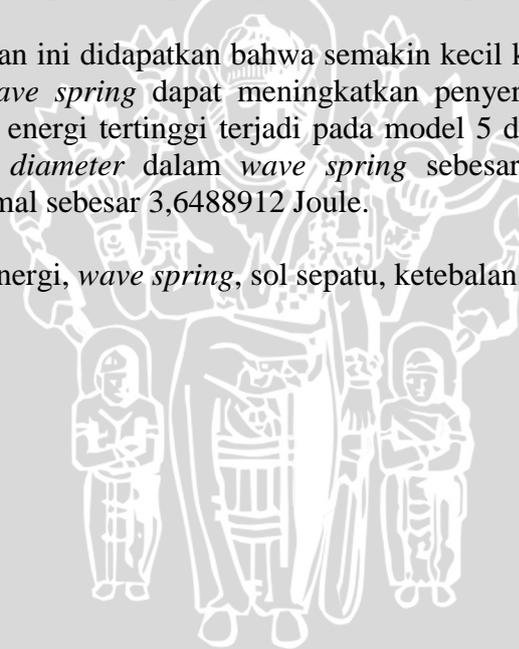
Redyarsa Dharma Bintara, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Januari 2015, Pengaruh Ketebalan Dan Diameter Dalam *Wave Spring* Pada Sol Sepatu *Sport* Terhadap Penyerapan Beban Kejut, dosen Pembimbing: Moch. Agus Choiron dan Anindito Purnowidodo.

Desain sepatu *sport* berkembang pesat dengan tujuan mengurangi cedera dan meningkatkan kenyamanan pengguna. Pengurangan cedera dilakukan dengan cara memperbesar energi yang diserap dari beban akibat pengguna berlari atau melompat. Pada penelitian ini dilakukan penambahan *wave spring* pada sol sepatu yang digunakan sebagai mekanisme penyerap beban kejut.

Pemodelan dilakukan pada sol sepatu dengan menggunakan bantuan *software finite element method (FEM) ANSYS 14.5 Academic*. Model uji terdiri dari 10 variasi yaitu 1 model tanpa penambahan *wave spring* dan 9 model dengan penambahan *wave spring* (variasi ketebalan dan diameter dalam *wave spring*). Model uji diberikan pembebanan berupa berat tubuh manusia dengan asumsi sebesar 60 kg dan kecepatan 2,425 m/s. Analisa penyerapan energi hanya difokuskan pada sol sepatu (*outsole*, *midsole* dan *insole*).

Dari hasil penelitian ini didapatkan bahwa semakin kecil ketebalan dan semakin besar diameter dalam *wave spring* dapat meningkatkan penyerapan energi pada sol sepatu *sport*. Penyerapan energi tertinggi terjadi pada model 5 dengan ketebalan *wave spring* 0,6096 mm dan diameter dalam *wave spring* sebesar 42,672 mm dengan penyerapan energi maksimal sebesar 3,6488912 Joule.

Kata kunci: penyerapan energi, *wave spring*, sol sepatu, ketebalan, diameter dalam.



SUMMARY

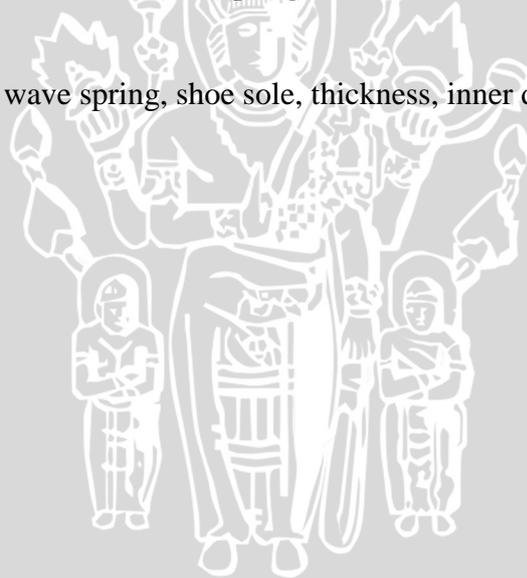
Redyarsa Dharma Bintara, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, January 2015, Effect of Thickness and Inner Diameter Wave Spring to Impact Load Absorption in Sport Shoe, Academic Supervisor: Moch. Agus Choiron and Anindito Purnowidodo.

Sport shoe design had been developed rapidly with the aim to reduce injuries and increase user comfort. Injury reduction is done by enlarging the energy absorbed from the running or jumping load. In this study, the addition of the wave spring on shoe sole is used as the load absorbing mechanism.

The shoes sole is modeled by using finite element method (FEM) *software* ANSYS 14.5 Academic. The experimental model has ten varieties. The test model is one model without addition a wave spring and nine test models are built with addition wave spring (thickness and inner diameter variation). Each test model load is applied with 60 kg human body assumption and velocity is 2.425 m/s. The energy absorption analysis is focused on shoe sole (outsole, midsole and insole).

Based on the simulation results, it was found that the decrease of thickness and the increase inner diameter can enlarge the energy absorption in shoes soles. The model number 5 has highest the energy absorption which is 3.6488912 Joule. This model has thickness and inner diameter of wave spring. It is 0.6096 mm and 42.672 mm respectively.

Keyword: energy absorb, wave spring, shoe sole, thickness, inner diameter.



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jogging atau biasa disebut lari santai merupakan kegiatan olahraga yang sering dilakukan oleh olahragawan guna menjaga kesehatan tubuh, diantaranya meningkatkan kekuatan pada kaki, kekuatan tulang dan dapat mengurangi berat badan. Olahraga ini tidak membutuhkan biaya yang banyak (*Running and jogging health benefits, 2013*) Olahraga ini dilakukan dengan kecepatan kurang dari 10 km/jam.

Sepatu *sport* yang sesuai merupakan faktor pendukung olahragawan. Sepatu *sport* harus didesain untuk mendukung kebutuhan penggunanya, khususnya dalam berolahraga. Penggunaan sepatu *sport* dapat dikategorikan menjadi dua yaitu pada beban ringan (ketika jalan kaki) dan pada beban berat (ketika berlari atau meloncat). Pada kondisi beban berat, sepatu *sport* harus mampu mereduksi atau meredam beban kejut. Apabila sepatu *sport* tidak bisa meredam beban kejut, tentunya pengguna sepatu *sport* akan mengalami ketidaknyamanan terhadap kakinya. Hal ini disebabkan beban kejut yang langsung diteruskan ke kaki pengguna. Beberapa masalah yang menyebabkan sepatu *sport* tersebut kurang nyaman dapat dirinci sebagai berikut:

- a. Bentuk struktur sepatu *sport* umumnya tidak bisa mendukung seluruh kebutuhan olahragawan, olahragawan dengan penggunaan kaki beban berat (*sprinter*, loncat jauh, voli dll) memerlukan desain sepatu khusus.
- b. Material sepatu *sport* yang tidak sesuai dengan kondisi kebutuhan olahragawan, dengan material sepatu *sport* yang terlalu lentur atau kaku dapat mempengaruhi gerakan olahragawan tersebut.

Jen-Rae Cho *et all* (2009) telah melakukan penelitian terhadap sol sepatu *sport* guna mempelajari karakteristik beban kejut sol bagian dalam ketika berlari. Dengan adanya penelitian ini dapat dijadikan acuan penetapan beban kejut sebagai masukan beban yang dibutuhkan pada pembuatan desain sol sepatu *sport*. Di sisi lain, desain *spring* sebagai salah satu komponen mesin yang berfungsi meredam beban kejut telah melahirkan satu bentuk inovasi desain *spring* yaitu *wave spring*. Arif Nugroho (2004) telah melakukan penelitian tentang *wave spring* dengan menggunakan bantuan *software Finite Element Method*. Kelebihan *wave spring* adalah dapat diaplikasikan sebagai pegas dengan ruang radial yang terbatas dan aksial yang kecil. *Wave spring* memberikan tingkat kemampuan pegas menjadi lebih baik, defleksi yang kecil dan

kestabilan dimensi yang relatif tetap, dimana *wave spring* ini sangat memungkinkan diaplikasikan pada tempat yang relatif kecil serta dapat menahan beban yang berat.

Berdasarkan latar belakang di atas muncul ide untuk memanfaatkan *wave spring* pada desain sol sepatu *sport* untuk mereduksi beban kejut, guna menunjang kenyamanan olahragawan, khususnya olahragawan dengan kebutuhan yang relatif berat (*sprinter*, voli, loncat jauh dan lain-lain).

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan desain sol sepatu *sport* dengan penambahan *wave spring* dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh ketebalan *wave spring* terhadap besar energi yang diserap oleh sol sepatu *sport* ?
2. Bagaimana pengaruh *diameter* dalam *wave spring* terhadap besar energi yang diserap oleh sol sepatu *sport* ?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini terarah maka penulis memberikan batasan-batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian hanya difokuskan pada penyerapan energi di sol sepatu (*insole*, *midsole* dan *outsole*).
2. Material yang digunakan dianggap isotropi.

1.4 Tujuan

- a. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh ketebalan *wave spring* terhadap besar energi yang diserap sol sepatu *sport*.
- b. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh *diameter* dalam *wave spring* terhadap besar energi yang diserap oleh sol sepatu *sport*.

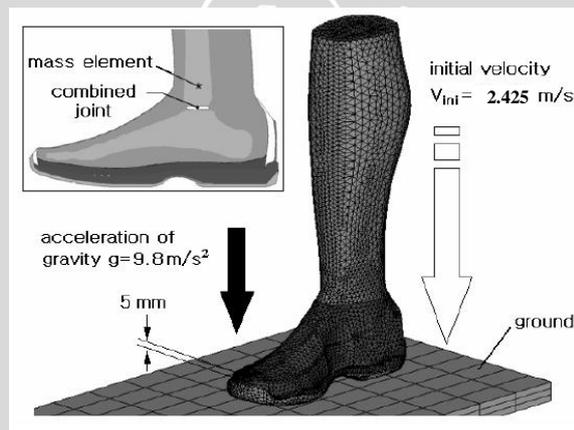
1.5 Manfaat

1. Melatih mahasiswa untuk mengembangkan produk inovatif dengan mengaplikasikan ilmu Teknik Mesin.
2. Membantu produsen sepatu lokal dalam pengembangan inovasi produk baru sepatu *sport*.
3. Menjadi dasar penelitian selanjutnya mengenai aplikasi *wave spring*.

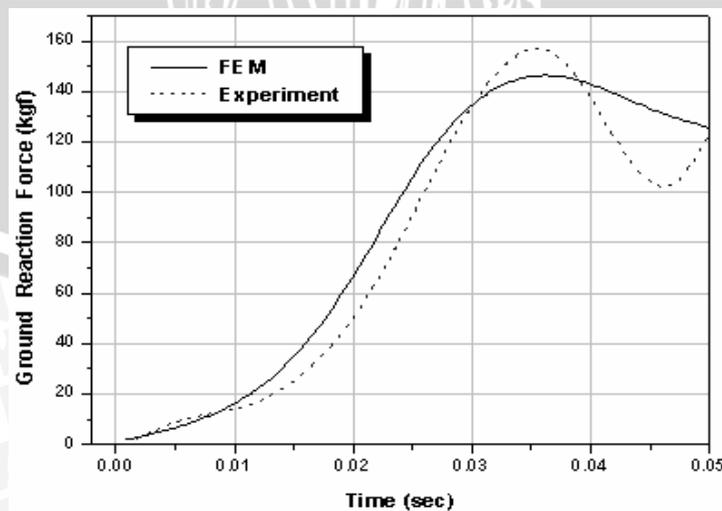
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Jin-Rae Cho, *et all* (2009) telah melakukan penelitian terhadap sol sepatu *sport* guna mempelajari karakteristik beban kejut sol bagian dalam ketika berlari. Gambar 2.1 menunjukkan model pembebanan sol sepatu, dimana penetapan beban kejut ini meliputi massa tumbukan sebesar 60 kg, kecepatan awal tumbukan 2,425 m/s, percepatan gravitasi 9,8 m/s², tinggi awal antara alas sepatu (*outsole*) dan *ground* sebesar 5 mm dan penetapan properti material (*bone, tissue, insole, midsole outsole* dan *ground*). Hasil penelitian Jin-Rae Cho, *et all* (2009) berupa karakteristik beban kejut ketika sol sepatu kontak dengan *ground* terhadap perubahan waktu (Gambar 2.2). Dengan adanya penelitian ini dapat dijadikan acuan penetapan beban kejut sebagai masukan beban yang dibutuhkan pada pembuatan desain inovatif sepatu *sport*.



Gambar 2.1 Model pembebanan sol sepatu
Sumber: Jin-Rae Cho, *et all* (2009)



Gambar 2.2 Grafik hubungan gaya reaksi dan waktu pembebanan
Sumber: Jin-Rae Cho, *et all* (2009)

Arif Nugroho (2004) telah melakukan penelitian tentang *wave spring* dengan menggunakan bantuan *software Finite Element Method*. Kelebihan *wave spring* adalah dapat diaplikasikan sebagai pegas dengan ruang radial yang terbatas dan aksial yang kecil. *Wave spring* memberikan tingkat kemampuan pegas menjadi lebih baik, defleksi yang kecil dan kestabilan dimensi yang relatif tetap, dimana *wave spring* ini sangat memungkinkan diaplikasikan pada tempat yang relatif kecil serta dapat menahan beban yang berat.

2.2 Sepatu Sport

Sepatu *sport* merupakan sepatu yang pada umumnya digunakan untuk olahragawan. Sepatu *sport* terdiri dari berbagai jenis, diantaranya sepatu *sport* untuk *running*, sepatu voli, sepatu basket dan lain-lain.

Sepatu *running* umumnya digunakan untuk pengguna yang dominan memakai untuk berlari. Bentuk sol sepatu *running* tidak rata dan juga tidak mempunyai paku sehingga pengguna dapat menggunakannya dimana saja, baik di jalan raya, *indoor court* ataupun permukaan jalan tanah (Gambar 2.3).



Gambar 2.3 Contoh sepatu *running*
Sumber: Zalora, 2014

Sepatu voli umumnya mempunyai karakteristik sama dengan sepatu lari, hanya saja ada teknologi yang diberikan sehingga dapat menghasilkan tenaga lompat yang besar (Gambar 2.4).



Gambar 2.4 Contoh sepatu voli
Sumber: *Volley ball central*, 2014

Sepatu basket umumnya bentuknya besar (*high*), mempunyai teknologi untuk mendukung daya lompat. Sepatu ini mempunyai sol rata karena lapangan basket mempunyai kontur permukaan yang rata (Gambar 2.5).



Gambar 2.5 Contoh sepatu basket
Sumber: Zalora, 2014

2.2.1 Susunan Komponen Penyusun Sepatu

Secara garis besar sepatu *sport* tersusun oleh beberapa komponen. Pada masing-masing komponen memiliki fungsi masing-masing. Gambar 2.6 menunjukkan susunan secara umum dari sol sepatu.



Gambar 2.6 Komponen penyusun sepatu
Sumber: Evatane, 2014

Fungsi tiap-tiap bahan:

- Rubber* : Digunakan untuk ketangguhan
- Low EVA Foam* : Digunakan untuk keringanan bahan
- PU Foam* : Kombinasi antara keringanan dan kenyamanan
- Leather & PVC* : Kualitas natural

2.3 Wave Spring

2.3.1 Tinjauan Umum Wave Spring

Wave spring adalah pegas yang dibentuk bergulung melingkar dan bergelombang. Desain ini telah memperkenalkan suatu konsep baru di dalam aplikasi pegas dengan ruang radial yang terbatas dan aksial yang kecil. *Wave spring* dapat

memberikan tingkat kemampuan pegas lebih baik, defleksi yang kecil dan kestabilan dimensi yang relatif tetap.

2.3.2 Jenis–Jenis *Wave Spring*

2.3.2.1 *Wave Spring* Putaran Tunggal (*Single Turn*)

Wave spring putaran tunggal adalah tipe *wave spring* yang hanya mempunyai satu putaran saja. Jenis ini yang paling luas digunakan dalam aplikasi pegas. *Wave spring* putaran tunggal dibagi dua tipe yaitu tipe *gap* dan tipe *overlap* (Gambar 2.7). *Wave spring* tipe *gap* dibuat penambahan celah, sedangkan tipe *overlap* dibuat tumpang-tindih dengan harapan mempermudah gerak secara melingkar.



Gambar 2.7 *Wave spring* putaran tunggal (a) tipe *gap* (b) tipe *overlap*
Sumber: *Smalley steel ring* (2011:13)

Ketika pegas mendapat beban, maka pegas akan mengalami defleksi. Akibat pembebanan ini, *diameter* luar dan *diameter* dalam bertambah lebih besar hingga *diameter* luar menyentuh dinding pembatas. Defleksi yang terus menerus menyebabkan pegas berhenti bergerak. Hal ini berlaku juga untuk *wave spring* tipe *overlap*.

2.3.2.2 *Wave Spring* Putaran Banyak (*Multiple Turn*) / *Spirawave*

Spirawave merupakan pegas yang tersusun secara parallel atau seri. Disain *wave spring* tipe *spirawave* tidak menggunakan penyambungan las, paku keling atau prosedur lain. *Spirawave* yang terus melingkar merupakan suatu pengemasan yang akurat sehingga menghapuskan kebutuhan penambahan langkah proses produksi konvensional (penyambungan las atau paku keling).

Disain *spirawave* telah memperkenalkan suatu konsep baru di dalam aplikasi pegas dengan ruang radial dan aksial yang relatif sempit. Karakteristik beban/defleksi *wave spring* dapat diatur untuk memperoleh suatu jangkauan kemampuan (kekakuan) pegas yang lebih luas, hal ini diakibatkan oleh bentuk *multiple-turn spirawave*. Jenis ini dibagi dalam dua tipe, yaitu:

1. *Spirawave Nested*

Spirawave nested adalah suatu pegas bergulung melingkar dan bergelombang yang disusun secara parallel (Gambar 2.8). *Spirawave nested* akan meningkatkan kemampuan (kekakuan) pegas sebanding dengan banyaknya putaran. Jenis ini digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan kekuatan yang besar dan defleksi yang kecil.



Gambar 2.8 *Wave spring tipe spirawave nested*
Sumber: *Smalley steel ring* (2011:13)

2. *Spirawave Crest-To-Crest*

Spirawave crest-to-crest adalah suatu pegas bergulung melingkar dan bergelombang yang disusun secara seri (Gambar 2.9). Tipe ini, akan mengurangi kemampuan (kekakuan) pegas sebanding dengan banyaknya putaran.



Gambar 2.9 *Wave spring tipe spirawave crest-to-crest*
Sumber: *Smalley steel ring* (2011:13)

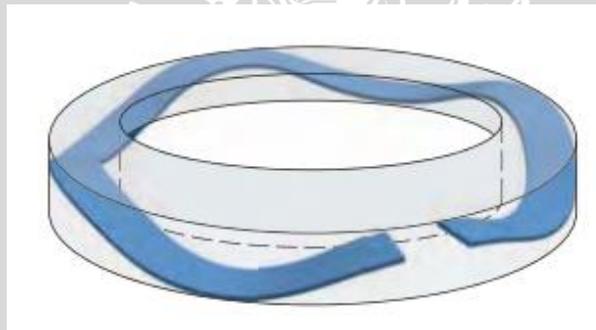
Spirawave crest-to-crest telah dikembangkan dengan kekuatan dan defleksi yang sama dengan *coil spring*. *Spirawave crest-to-crest* hanya memerlukan sepertiga ($1/3$) atau kurang dari ketinggian *coil spring* (Gambar 2.10) Tetapi ini perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan membandingkan antara *spirawave crest-to-crest* dengan *coil spring*.



Gambar 2.10 Perbandingan *wave spring* dengan *coil spring*
 Sumber: *Smalley steel ring* (2011:12)

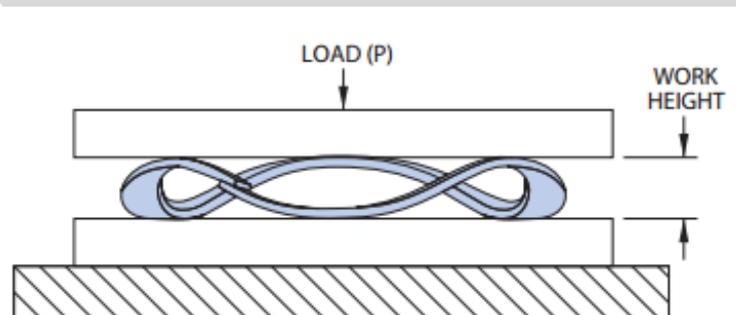
2.3.3 Lingkup Kerja *Wave Spring*

Wave spring dapat digunakan pada kedua aplikasi pegas yaitu statis dan dinamis. Ruang kerja *wave spring* terdiri dari operasi pegas yang diposisikan di dalam lubang atau di luar poros (Gambar 2.11). Jarak antara pembebanan permukaan dengan alas menggambarkan ruang kerja secara aksial atau tinggi kerja pegas (Gambar 2.12).



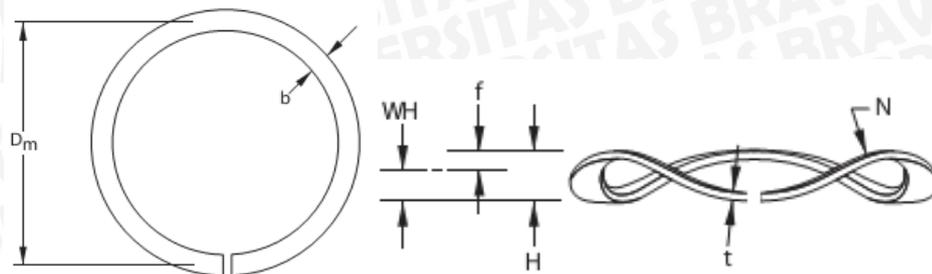
Gambar 2.11 Ruang kerja *wave spring*
 Sumber: *Smalley steel ring* (2011:109)

Pembebanan dinamis, temperatur tinggi, kondisi lingkungan merupakan faktor yang dapat merusak, sehingga harus dipertimbangkan di dalam aplikasi pegas. Solusi dari berbagai kondisi lingkungan tersebut, memerlukan pemilihan bahan baku yang optimal dan tegangan operasi yang sesuai.

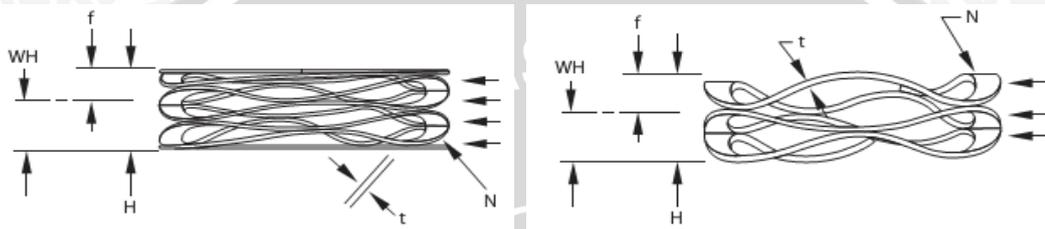


Gambar 2.12 Pembebanan pada *wave spring*
 Sumber: *Smalley steel ring* (2011:109)

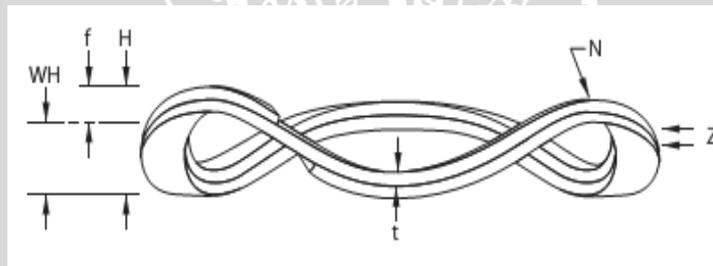
2.3.4 Istilah-Istilah Dalam Wave Spring



Gambar 2.13 Istilah pada wave spring tipe gap
Sumber: Smalley steel ring (2011:110-111)



Gambar 2.14 Istilah pada wave spring tipe crest-to-crest
Sumber: Smalley steel ring (2011:110-111)



Gambar 2.15 Istilah pada wave spring tipe nested
Sumber: Smalley steel ring (2011:110-111)

1. Free Height (H)

Free height atau tinggi bebas adalah tinggi wave spring dalam keadaan normalnya atau tinggi wave spring sebelum diberi pembebanan.

2. Work Height (WH)

Work height atau tinggi kerja adalah tinggi bebas wave spring yang sudah diberi beban atau tinggi bebas wave spring dikurangi dengan defleksi.

$$WH = H - f \quad (2-1)$$

3. Outside Diameter (D_{out})

Outside diameter adalah diameter wave spring bagian terluar.

4. Inside Diameter (D_{in})

Inside diameter adalah diameter wave spring bagian dalam.

5. Mean Diameter (D_m)

Mean diameter atau diameter tengah adalah diameter rata-rata antara diameter luar dan diameter dalam dari wave spring.

$$D_m = (D_{out} + D_{in}) / 2 \quad (2-2)$$

6. Radial Width (b)

Radial width atau jarak jari-jari lingkaran adalah jarak rata-rata dari pengurangan diameter luar dengan diameter dalam.

$$b = (D_{out} - D_{in}) / 2 \quad (2-3)$$

7. Thickness (t)

Thickness adalah ketebalan dari wave spring.

8. Number of Wave (N)

Number of wave adalah jumlah gelombang setiap satu putaran wave spring.

9. Multiple Wave Factor (K)

Multiple wave factor adalah faktor perkalian gelombang didasarkan pada jumlah gelombang untuk setiap putaran.

Tabel 2.1. Faktor Perkalian Gelombang (K) Pada Wave Spring

Jumlah Putaran (N)	2,0 – 4,0	4,5 – 6,5	7,0 – 9,5	10.0 – keatas
(K)	3,88	2,90	2,30	2,13

Sumber: Smalley steel ring (2011:110)

10. Spring Rate

Spring rate atau kekakuan pegas dari suatu pegas yang dibebani secara aksial didefinisikan sebagai beban yang dibutuhkan untuk menghasilkan suatu defleksi satuan dari pegas.

$$k = \frac{P}{f} \quad (\text{Smalley Steel Ring, 2002:29})(2-4)$$

Keterangan:

k : Kekakuan pegas (N/m)

P : Gaya yang bekerja (N)

f : Defleksi (m)

2.3.5 Aplikasi Wave Spring

Wave spring tidak dirancang untuk defleksi yang besar seperti coil spring, tetapi dirancang untuk beban yang relatif tinggi dengan defleksi yang kecil. Wave spring hanya digunakan sebagai aplikasi ring penahan dengan bentuk gelombang didalamnya, yang membutuhkan ruang radial dan aksial yang kecil. Berbeda dengan coil spring,

yang sebagian besar digunakan untuk aplikasi sebagai suspensi kendaraan, dengan *diameter* kecil dan defleksi yang besar diperlukan untuk membuat pengendaraan nyaman ketika kendaraan berjalan di jalan yang tidak rata. Dari efek tersebut, hal yang sama dapat dilakukan di dalam *wave spring*. Beberapa contoh aplikasi *wave spring* sebagai berikut:

1. *Bearing Pre-Load*

Pembebanan awal pada *wave spring* akan mengurangi kelonggaran pada *bearing* dan memperkecil suara gaduh *bearing*. Tekanan kecil/ sedang akan mengurangi kelonggaran antara bantalan peluru dengan bagian dalam dan bagian luar *bearing*. Pembebanan awal tersebut dapat mengurangi kemungkinan terjadinya kerusakan *bearing* dalam kaitan dengan getaran (beban getar) (Gambar 2.16).



Gambar 2.16 Aplikasi *wave spring* pada *bearing pre-load*
Sumber: *Smalley steel ring* (2011:16)

2. *Flow Valve*

Aplikasi *wave spring* pada *flow valve* berguna sebagai penahan gerak variabel lubang piston. Ketika tekanan cairan meningkat, pegas *spirawave crest-to-crest* akan termampatkan, akibatnya pegas ini dapat mengendalikan aliran fluida sesuai dengan bertambahnya tekanan (Gambar 2.17).



Gambar 2.17 Aplikasi *wave spring* pada *flow valve*
Sumber: *Smalley steel ring* (2011:16)

3. Quick Disconnect

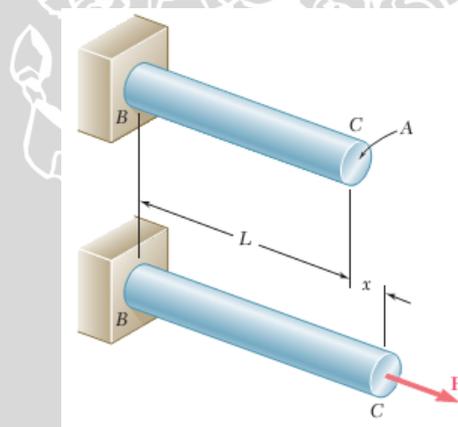
Pada aplikasi *quick disconnect*, *spirawave crest-to-crest* digunakan sebagai pengganti pegas kawat bulat konvensional dan mengurangi tinggi operasi hingga lebih dari 15% (Gambar 2.18).



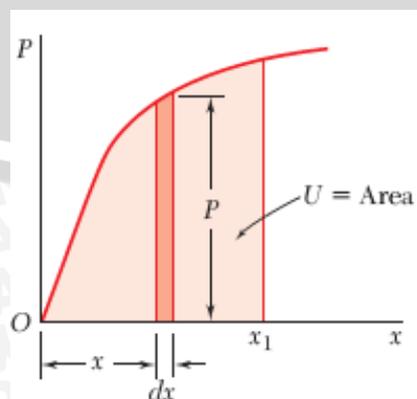
Gambar 2.18 Aplikasi *wave spring* pada *quick disconnect*
Sumber: *Smalley steel ring* (2011:17)

2.4 Energi Regangan (*Strain Energy*)

Energi regangan merupakan besarnya energi yang dibutuhkan untuk memindahkan suatu partikel dari titik awal ke titik tertentu. Gambar 2.19 menunjukkan sebuah batang yang dijepit pada sisi B dan mendapat beban (P) pada sisi C. Ketika beban mencapai titik maksimum, maka batang akan terdeformasi dengan jarak x .



Gambar 2.19 Beban aksial pada batang
Sumber: *Beer et all* (2012:694)



Gambar 2.20 Grafik hubungan deformasi dan beban
Sumber: *Beer et all* (2012:695)

Gambar 2.20 menunjukkan diagram hubungan deformasi dan beban yang terjadi. Kerja merupakan luasan di bawah kurva hubungan deformasi. Kerja (dU) pada deformasi yang kecil (dx) akibat beban (P) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$dU = P dx \quad (\text{Beer et all, 2012:62})(2-5)$$

Sehingga kerja total yang terjadi pada luas di bawah kurva antara jarak $0 - x_1$ merupakan besarnya energi regangan dan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$U = \int_0^{x_1} P dx \quad (\text{Beer et all, 2012:62})(2-6)$$

Robert Hooke telah mengamati bahwa pertambahan panjang benda berbanding lurus dengan besar gaya yang bekerja.

$$P = kx \quad (\text{Sears, Zemensky, 1962:170})(2-7)$$

Keterangan:

dU : Kerja pada deformasi yang kecil (Joule)

U : Kerja total di bawah kurva (Joule)

P : Gaya yang bekerja (N)

dx : Perpindahan deformasi yang kecil (m)

k : Kekakuan material (N/m)

Jika persamaan 2-7 disubstitusikan ke persamaan 2-6 maka didapatkan persamaan kerja.

$$U = \int_0^{x_1} P dx = \int_0^{x_1} kx dx \quad (2-8)$$

$$U = \frac{1}{2} kx^2 \Big|_0^{x_1} = \frac{1}{2} kx_1^2 - \frac{1}{2} kx_0^2 = \frac{1}{2} k(x_1^2 - x_0^2)$$

Keterangan:

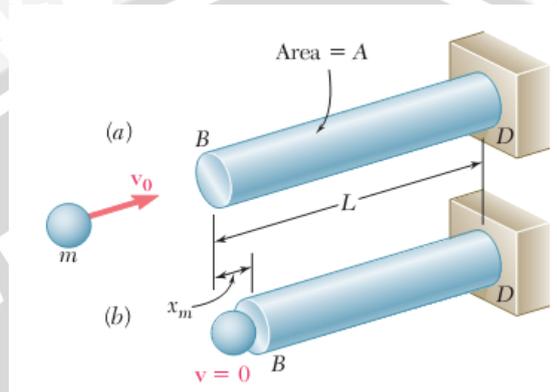
$x_1^2 - x_0^2$: Defleksi pada benda (m)

2.5 Energi Yang Diserap Sol Sepatu *Sport*

Energi yang diserap sol sepatu *sport* merupakan besar energi yang mampu diterima oleh sol sepatu *sport* (*insole*, *midsole* dan *outsole*) ketika sol sepatu *sport* tumbukan dengan *ground*. Ketika sol sepatu kontak dengan *ground*, maka sol sepatu *sport* akan menerima beban kejut sehingga sol sepatu *sport* akan terdeformasi. Korelasi antara besar beban kejut dan deformasi maksimum sol sepatu *sport* merupakan besar energi yang mampu diserap oleh sol sepatu *sport*. Hal ini sesuai dengan teori *strain energy*.

2.6 Beban *Impact*

Beban terdiri dari dua macam yaitu, beban statis dan beban dinamis. Beban statis diberikan pada suatu benda secara perlahan-lahan dan secara terus menerus dengan selang waktu tertentu, sedangkan beban dinamik merupakan beban yang diberikan pada benda secara tiba-tiba atau sesaat (kejut). Salah satu contoh dari aplikasi beban dinamik adalah ketika sebuah bola menumbuk batang pada kecepatan tertentu (Gambar 2.21).



Gambar 2.21 Beban *impact* pada batang
Sumber: Beer *et al* (2012:716)

Besarnya energi kinetik yang diserap oleh batang sama dengan total energi yang dibutuhkan batang untuk berdeformasi sepanjang X_m .

$$U = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{Beer } et \text{ all, } 2012:716)(2-9)$$

Pada kasus deformasi elastis, besarnya energi regangan dapat ditunjukkan pada persamaan 2-10.

$$U = \int \frac{\sigma^2}{2E} dV \quad (\text{Beer } et \text{ all, } 2012:716)(2-10)$$

Dengan mengasumsikan batang mempunyai sifat isotropi maka:

$$U = \frac{\sigma^2}{2E} V \quad (\text{Beer } et \text{ all, } 2012:716)(2-11)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{U \cdot 2E}{V}} = \sqrt{\frac{mv^2 E}{V}}$$

Keterangan:

- m : Massa (kg)
- U : Energi regangan (Joule)
- v : Kecepatan (m/s)
- V : Volume batang (m³)
- σ : Tegangan maksimal (Pa)

2.7 Impuls dan Momentum

Impuls dan *momentum* didasarkan dari hukum-hukum gerak Newton. *Momentum* merupakan besaran vektor. Arah *momentum* sama dengan arah kecepatan benda atau arah gerakan benda. *Momentum* berbanding lurus dengan massa dan kecepatan. Semakin besar massa dan kecepatan, maka semakin besar pula *momentum*. *Impuls* merupakan hasil kali dari gaya resultan dan waktu. Berdasarkan hukum kedua Newton, besarnya gaya dipengaruhi oleh massa dan percepatan (persamaan 2-12).

$$P = m \frac{dv}{dt} \quad (\text{Sears, Zemensky, 1962:191})(2-12)$$

$$P dt = m dv$$

Jika v_1 adalah kecepatan ketika t_1 dan v_2 adalah kecepatan ketika t_2 maka:

$$\int_{t_1}^{t_2} P dt = \int_{v_1}^{v_2} m dv \quad (\text{Sears, Zemensky, 1962:191})(2-13)$$

Keterangan:

P : Gaya yang bekerja (N)

dt : Perubahan waktu (s)

dv : Perubahan kecepatan (m/s)

m : Massa (kg)

Pada persamaan 2-13, bentuk integral ruas kiri merupakan besar *impuls* dalam selang waktu ($t_2 - t_1$), sedangkan bentuk integral ruas kanan merupakan besar *momentum*.

2.8 Analisa Tegangan dan Regangan

Tegangan (*stress*) didefinisikan sebagai gaya yang terdistribusi pada setiap luas penampang (*cross section*). Dalam kasus yang sederhana dapat diilustrasikan pada sebuah batang yang diberi gaya aksial. Gaya (P) yang bekerja pada luasan (A) disebut sebagai tegangan (σ) (Gambar 2.22).

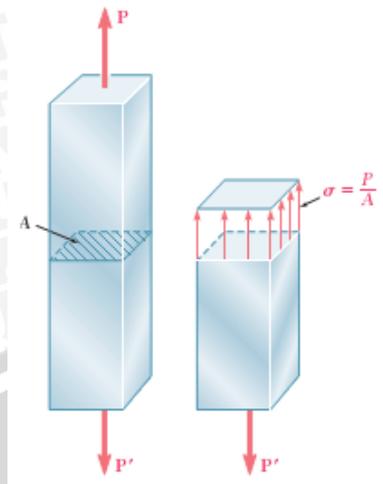
$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (\text{Beer et all, 2012:9})(2-14)$$

Keterangan:

P : Gaya yang bekerja (N)

A : Luas area (m²)

σ : Tegangan (Pa)



Gambar 2.22 Batang dengan beban aksial
 Sumber: Beer *et all* (2012:7)

Tegangan tarik (*tensile stress*) ditandai dengan nilai positif, sedang tegangan tekan (*compressive stress*) ditandai dengan nilai negatif. Karena tegangan bekerja dalam arah tegak lurus permukaan terpotong maka ia disebut tegangan normal, sedangkan tegangan yang arah gayanya sejajar dengan luasan permukaan potong disebut tegangan geser. Sedangkan rasio antara pertambahan panjang (δ) dengan panjang awalnya (L) disebut sebagai regangan (ϵ) (persamaan 2-15).

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (\text{Beer } et \text{ all, } 2012:56)(2-15)$$

Keterangan:

ϵ : Regangan (m/m)

δ : Pertambahan panjang (m)

L : Panjang awal (m)

2.8.1 Defleksi

Defleksi merupakan perubahan bentuk pada balok dalam arah X atau arah Y akibat adanya pembebanan yang diberikan pada balok atau batang. Jika balok atau batang mendapat pembebanan searah *transversal* maupun aksial baik itu beban terpusat maupun merata, akan mengalami defleksi (Gambar 2.23). Faktor penyebab terjadinya defleksi yaitu:

- Kekakuan batang

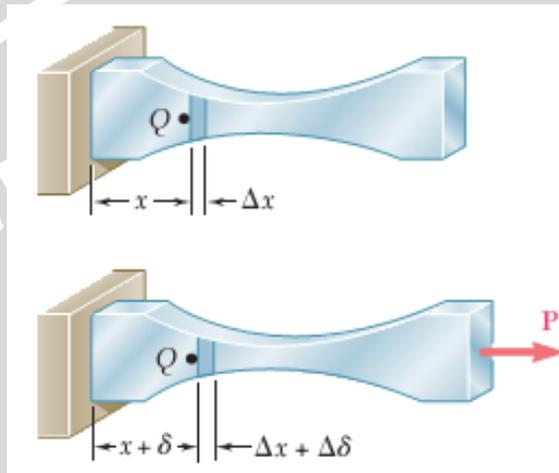
Semakin kaku suatu batang, maka defleksi yang terjadi akan semakin kecil.

- Gaya pembebanan

Besar kecilnya gaya yang diberikan pada batang berbanding lurus dengan besarnya defleksi. Semakin besar gaya pembebanan yang diberikan, maka defleksi yang terjadi semakin besar pula.

- Jenis tumpuan yang diberikan

Besar reaksi dan arah pada tiap jenis tumpuan berbeda-beda, sehingga penggunaan tumpuan yang berbeda akan menghasilkan besar defleksi yang berbeda pula.



Gambar 2.23 Pertambahan panjang pada batang dengan beban aksial
Sumber: Beer *et al* (2012:68)

Secara matematis, besar pertambahan panjang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\delta = \int_0^L \frac{P \, dx}{AE} \quad (\text{Beer } et \, all, 2012:68)(2-16)$$

Keterangan:

δ : Pertambahan panjang (m)

L : Panjang batang (m)

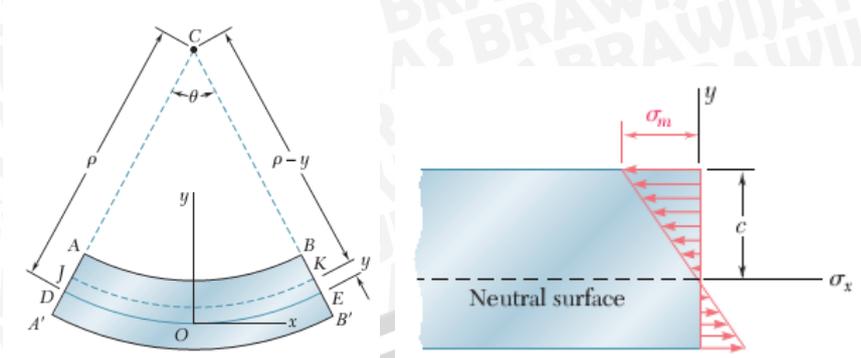
P : Gaya yang bekerja (N)

A : Luas area (m²)

E : Modulus elastisitas (Pa)

2.8.2 Beban *Bending*

Beban *bending* adalah beban yang diterima oleh suatu batang searah tegak lurus dengan sumbunya. Suatu balok akan mengalami defleksi ketika menerima beban *bending*. Defleksi ini mengakibatkan distribusi tegangan pada balok (Gambar 2.24).



Gambar 2.24 Distribusi tegangan akibat beban *bending*
 Sumber: Beer *et all* (2012:227-229)

Besarnya tegangan pada balok ini dipengaruhi oleh *moment of inertia*.

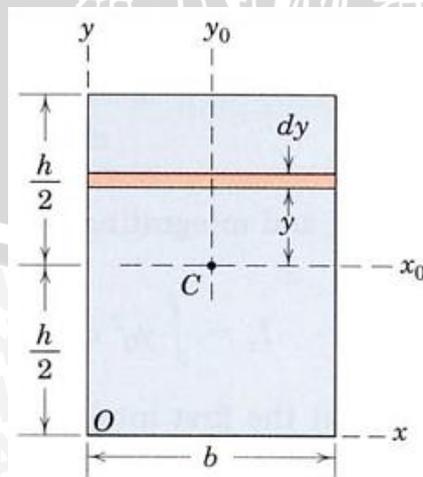
$$\sigma_m = \frac{M \cdot c}{I} \quad (\text{Beer } et \text{ all, } 2012:230)(2-17)$$

Keterangan:

- σ_m : Tegangan maksimum (Pa)
- M : Momen *bending* (N.m)
- c : Jarak antara tegangan maksimal dengan *neutral surface* (m)
- I : *Moment of Inertia* (m⁴)

2.8.3 *Moment of Inertia*

Inertia adalah ukuran kemampuan suatu benda untuk menahan pergerakan. Sedangkan *moment of inertia* adalah ukuran kemampuan suatu *beam*/batang untuk menahan pergerakan terhadap beban *bending*. Besarnya *moment of inertia* dapat dipengaruhi oleh luasan penampang suatu balok. Gambar 2.25 merupakan salah satu contoh perhitungan *moment of inertia* pada penampang bujur sangkar.



Gambar 2.25 Penampang bujur sangkar
 Sumber: Meriam J.L (2002:432)



Persamaan *moment of inertia* pada penampang bujur sangkar ditunjukkan pada persamaan 2-18.

$$I_x = \int y^2 dA = \bar{I}_x = \int_{-h/2}^{h/2} y^2 b dy = \frac{bh^3}{12} \quad (\text{Meriam J.L, 2002:432})(2-18)$$

Keterangan:

I_x : *Moment of inertia* terhadap sumbu x (m^4)

b : Lebar penampang (m)

h : Tinggi penampang (m)

2.8.4 Tegangan Pada *Wave Spring*

Pembebanan secara aksial pada *wave spring* menimbulkan tegangan *bending* yang sama dengan penekukan suatu balok sederhana. Tegangan yang terjadi pada *wave spring* putaran tunggal ditunjukkan pada persamaan 2-19.

$$\sigma = \frac{3\pi \cdot P \cdot D_m}{4 \cdot b \cdot t^2 \cdot N^2} \quad (\text{Smalley steel ring, 2011:110})(2-19)$$

Keterangan:

σ : Tegangan (Pa)

b : Jarak jari-jari lingkaran material (m)

D_m : *Diameter* tengah (m)

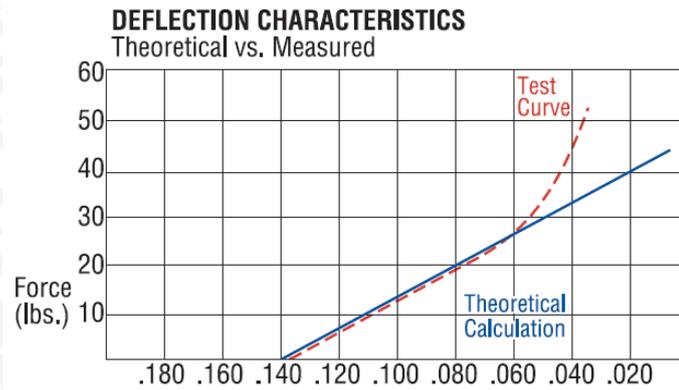
N : Jumlah gelombang setiap putaran

P : Gaya yang bekerja (N)

t : Tebal material (m)

2.8.5 Defleksi Pada *Wave spring*

Pembebanan secara aksial pada *wave spring* akan mengakibatkan terjadinya defleksi. Pembebanan tersebut akan menimbulkan perubahan dimensi pegas secara aksial maupun radial. Defleksi pada *wave spring* putaran tunggal ditunjukkan pada persamaan 2-20. Karakteristik defleksi *wave spring* secara teoritis dan pengukuran ditunjukkan pada Gambar 2.26.



Gambar 2.26 Karakteristik defleksi *wave spring*
Sumber: *Smalley steel ring* (2011:112)

$$f = \frac{P \cdot K \cdot D_m^3}{E \cdot b \cdot t^3 \cdot N^4} \times \frac{D_{in}}{D_{out}} \quad (\text{Smalley steel ring, 2011:110})(2-20)$$

Keterangan:

- f : Defleksi (m)
 D_{out} : Diameter luar (m)
 D_{in} : Diameter dalam (m)
 K : Faktor perkalian gelombang, (Tabel 2.1)
 P : Gaya yang bekerja (N)
 t : Tebal *wave spring* (m)

Jika persamaan 2-20 disubstitusikan dengan persamaan 2-8 maka didapatkan persamaan energi pada *wave spring*:

$$U = \frac{1}{2} k (x_1^2 - x_0^2) = \frac{1}{2} k \cdot f = \frac{1}{2} k \left(\frac{P \cdot K \cdot D_m^3}{E \cdot b \cdot t^3 \cdot N^4} \times \frac{D_{in}}{D_{out}} \right) \quad (2-21)$$

Jika persamaan 2-19 disubstitusikan dengan persamaan 2-11 maka didapatkan persamaan energi berdasarkan tegangan yang terjadi:

$$U = \frac{\sigma^2}{2E} V = \frac{\left(\frac{3\pi \cdot P \cdot D_m}{4 \cdot b \cdot t^2 \cdot N^2} \right)^2}{2E} V = \left(\frac{3\pi \cdot P \cdot D_m}{4 \cdot b \cdot t^2 \cdot N^2} \right)^2 \frac{V}{2E} \quad (2-22)$$

2.9 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan-permasalahan fisika dengan persamaan differensial. Prosedur perhitungan dengan metode elemen hingga antara lain sebagai berikut:

1. Diskritisasi dan pemilihan elemen (proses *meshing*)

Proses diskritisasi bertujuan untuk membagi struktur menjadi elemen-elemen kecil. Pada setiap elemen dihubungkan oleh titik simpul (*node*). Pendekatan numerik terjadi pada setiap titik simpul ini (*node*).

2. Memilih fungsi pendekatan

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

3. Menurunkan persamaan matrik kekakuan [k]

Dengan menggunakan prinsip usaha, akan dihasilkan persamaan matrik kekakuan elemen yang dinyatakan sebagai berikut:

$$[k] = \int [B]^T [C] [B] dV \quad (\text{Grandin,1986})(2-23)$$

Keterangan:

[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 pada sebuah struktur dibagi menjadi 3 macam, sehingga beban total dapat dirumuskan berdasarkan persamaan 2-24.

$$F = Q_{NF} + Q_{BF} + Q_T \quad (\text{Grandin,1986})(2-24)$$

Keterangan:

F : Gaya total

Q_{NF} : Beban pada konsentrasi nodal

Q_{BF} : Beban *body force*

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. Bentuk persamaan global elemen sesuai dengan persamaan 2-25.

$$\{R\} = [k]\{q\} \quad (\text{Grandin,1986})(2-25)$$

Keterangan:

$\{R\}$: Matrik beban total

$[k]$: Matrik kekakuan elemen

$\{q\}$: Matrik vektor perpindahan simpul (*node*)

Setelah persamaan matrik global terbentuk dan syarat-syarat batasnya dimasukkan, maka perpindahan simpul (q) dapat diketahui.

6. Mendapatkan perpindahan global

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

$$k_{1.1}q_1 + k_{1.2}q_2 \dots \dots \dots + k_{i.j}q_n = R_1 \quad (\text{Grandin,1986})(2-26)$$

$$k_{2.1}q_1 + k_{2.2}q_2 \dots \dots \dots + k_{i.j}q_n = R_2$$

$$k_{3.1}q_1 + k_{3.2}q_2 \dots \dots \dots + k_{i.j}q_n = R_3$$

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

7. Mendapatkan besaran sekunder dan interpretasi hasil

Dari besaran pertama yang berupa perpindahan, dapat dicari besaran sekunder yang dapat berupa tegangan maupun regangan. Hubungan tegangan-regangan pada kondisi 3D dapat dinyatakan dalam bentuk matrik sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{\nu} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{\nu} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{\nu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

Hubungan tersebut dapat ditulis dalam bentuk simbol berikut:

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\} \quad (\text{Grandin,1986})(2-28)$$

Hubungan regangan dengan perpindahan adalah:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{d\} \quad (\text{Grandin,1986})(2-29)$$

Sehingga tegangan dapat dirumuskan sebagai:

$$\{\sigma\} = [C][B]\{d\} \quad (\text{Grandin,1986})(2-30)$$

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

2.10 Hipotesis

Dari tinjauan pustaka yang didapat, maka muncul hipotesis dari permasalahan yang diamati. Penurunan nilai ketebalan (t) dan peningkatan besar *diameter* dalam (D_{in}) *wave spring* meningkatkan besar energi yang diserap oleh sol sepatu, hal ini disebabkan karena penurunan nilai ketebalan (t) dan peningkatan besar *diameter* dalam (D_{in}) mengurangi luas area penampang *wave spring*, sehingga besar *moment of inertia wave spring* semakin menurun akibatnya meningkatkan tegangan serta besar energi yang diserap oleh *wave spring*.



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode yang digunakan di dalam menyelesaikan masalah dalam penelitian ini adalah eksperimental semu, yaitu mengambil data dari simulasi program dengan bantuan *software* ANSYS 14.5 *Academic*. Metode ini bertujuan untuk mendapatkan informasi yang dapat digunakan sebagai acuan maupun perkiraan dalam melaksanakan eksperimen secara nyata. Disamping itu juga dilakukan studi literatur untuk memperoleh informasi tambahan berkenaan dengan penelitian yang dilakukan. Dalam hal ini peneliti berusaha sedekat mungkin memberikan asumsi yang mendekati eksperimen aslinya.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Studio Perancangan dan Rekayasa Sistem Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya pada bulan September-Oktober 2014.

3.3 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

a. Variabel bebas

Variabel bebas adalah variabel yang besarnya ditentukan oleh peneliti, nilainya dapat diubah-ubah dengan metode tertentu untuk mendapatkan nilai variabel terikat dari objek penelitian, sehingga dapat diperoleh hubungan antara keduanya. Variabel bebas dari penelitian ini yaitu:

- Tebal *wave spring* : 0,8128 ; 0,762 ; 0,6096 mm
- *Diameter* dalam *wave spring* : 36,576 ; 42,672 ; 49,022 mm

b. Variabel terikat

Variabel terikat adalah variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas yang telah ditentukan dan diketahui setelah penelitian dilakukan. Variabel terikat dalam penelitian ini yaitu:

- Besar gaya reaksi pada sol sepatu
- Deformasi sol sepatu
- Energi yang diserap oleh sol sepatu

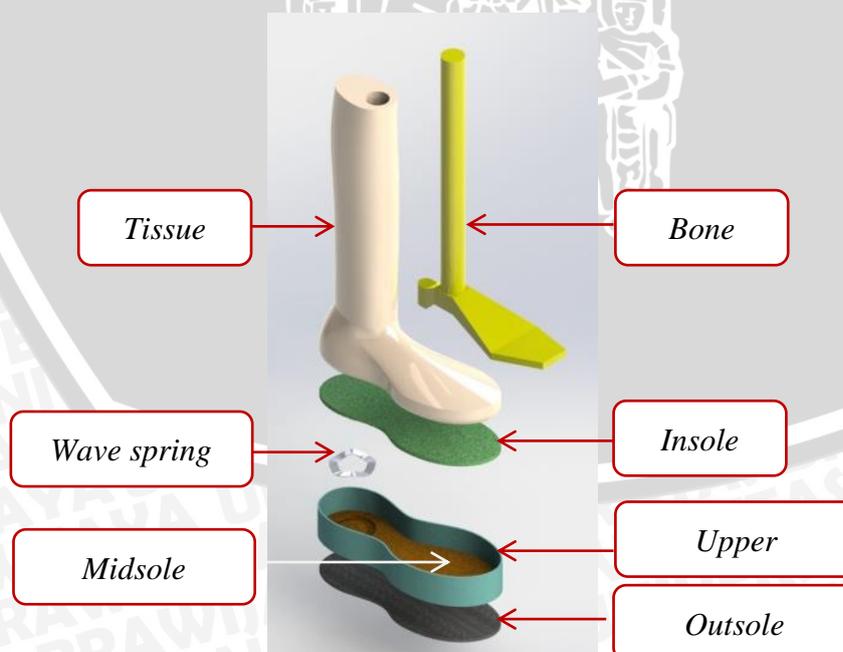
c. Variabel terkontrol

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

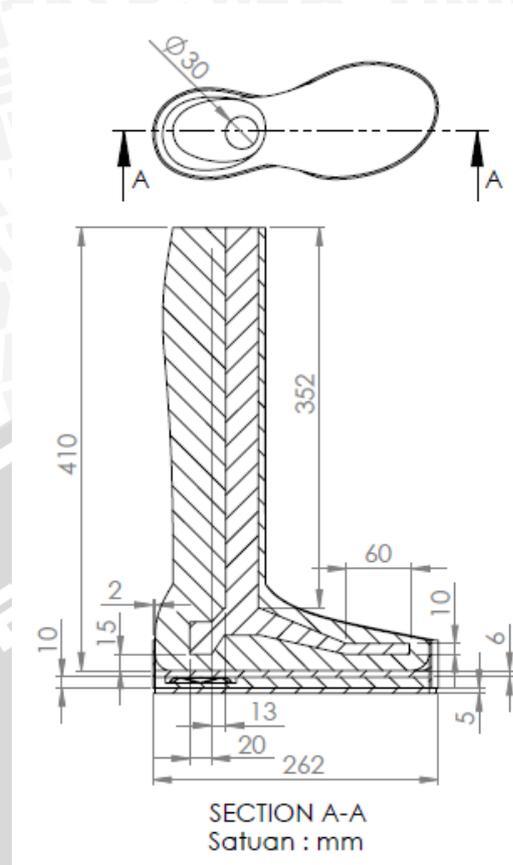
- Massa saat tumbukan sebesar 60 kg
- Kecepatan awal saat tumbukan 2,425 m/s
- Percepatan gravitasi 9,8 m/s²
- Jarak awal antara sol bagian luar (*outsole*) dengan *ground* sebesar 5 mm
- Koefisien gesek antara *outsole* dengan *ground* sebesar 0,5
- Pembebanan dilakukan selama 0,08 detik
- Tinggi bebas (*free height*) standar *wave spring* 4,318 mm
- Jumlah gelombang *wave spring* sebanyak 4
- *Diameter* luar *wave spring* 57,15 mm
- Tipe *wave spring* yang digunakan adalah tipe *gap* putaran tunggal
- Ukuran sepatu 42 standar Eropa (panjang max: 26 cm)

3.4 Bahan dan Peralatan Penelitian

Bahan yang digunakan untuk penelitian ini adalah model dari *outsole*, *midsole*, *wave spring*, *insole*, *tissue*, *upper*, *bone* dan *ground* yang dimodelkan dengan bantuan *software* CAD. Gambar 3.1 menunjukkan susunan model sol sepatu dengan penambahan *wave spring*. Dimensi model uji ditunjukkan pada Gambar 3.2.

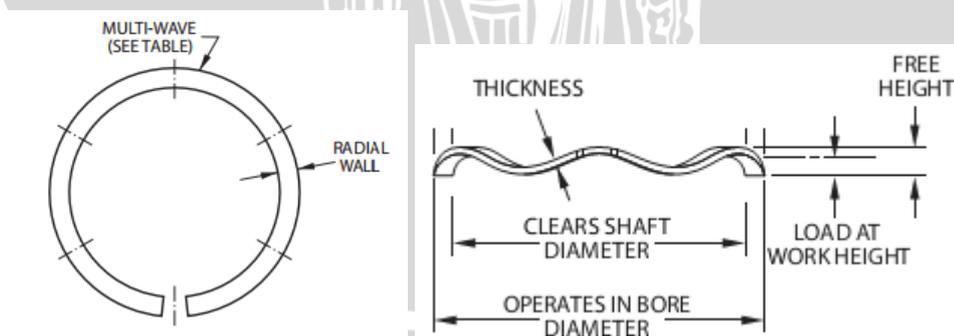


Gambar 3.1 Susunan sol sepatu dengan penambahan *wave spring*



Gambar 3.2 Dimensi model uji

Peralatan yang digunakan untuk menunjang penelitian ini adalah seperangkat unit komputer, *software* CAD dan ANSYS 14.5 *Academic*. Variasi model dan properti material *wave spring* tipe *gap* putaran tunggal yang akan diuji ditunjukkan pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2. Properti material *bone*, *tissue*, *insole*, *midsole*, *upper* dan *ground* ditunjukkan pada Tabel 3.3.



Gambar 3.3 Dimensi *wave spring*
 Sumber: *Smalley steel ring* (2011:19)

Tabel 3.1. Material Properti *Wave Spring*

Material	Modulus Elastisitas, E (GPa)	Poison's Ratio (ν)	Densitas, ρ (kg/m ³)
<i>Carbon steel</i>	206,84	0,3	7890

Tabel 3.2. Variasi Pemodelan *Wave Spring Type Gap*

Variasi ke	<i>Clears shaft Diameter, D_{in}</i> (mm)	Ketebalan, t (mm)
1	36,576	0,6096
2	36,576	0,762
3	36,576	0,8128
4	42,672	0,6096
5	42,672	0,762
6	42,672	0,8128
7	49,022	0,6096
8	49,022	0,762
9	49,022	0,8128

Tabel 3.3. Properti Material *Bone, Tissue, Insole, Midsole, Upper* dan *Ground*

Material	Modulus Elastisitas, E (MPa)	<i>Poisson's Ratio</i> (ν)	Densitas, ρ (kg/m ³)
<i>Bone</i>	7500	0,34	1500
<i>Tissue</i>	1,15	0,49	28351,09759
<i>Insole</i>	1,98	0,35	2300
<i>Midsole</i>	2,49	0,35	2300
<i>Ground</i>	10	0,36	6000
<i>Upper</i>	11,76	0,35	9400

Sumber: Jin-Rae Cho, *et all* (2009)

Nilai densitas material *tissue* diperbesar dengan tujuan untuk pembebanan pada setiap model yaitu 60 kg. Pemodelan material outsole (rubber) menggunakan teori Mooney-Rivlin 5 parameter dengan besar bulk modulus (k) sebesar 10 MPa (Tabel 3.4).

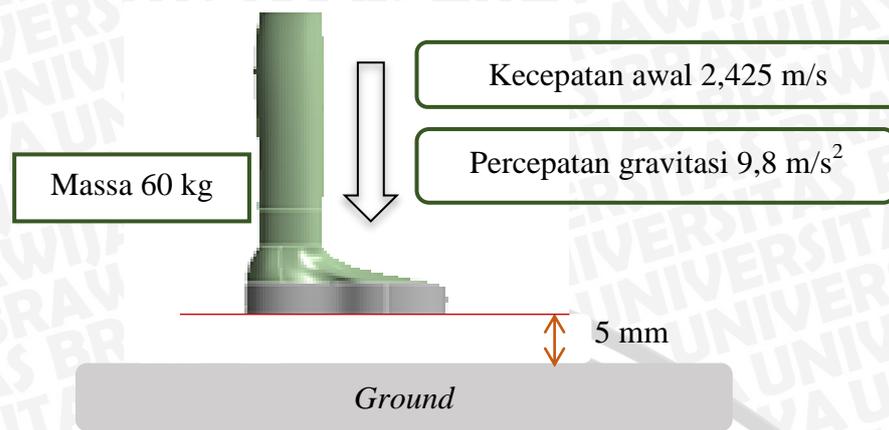
Tabel 3.4. Properti Material *Outsole (Rubber)*

Material	Densitas (kg/m ³)	C ₁₀ (MPa)	C ₀₁ (MPa)	C ₂₀ (MPa)	C ₁₁ (MPa)	C ₀₂ (MPa)	d (1/Mpa)
<i>Outsole</i>	1010	-0,00149	0,11732	0,0172	-0,00182	0,02	0,1

Sumber: Jin-Rae Cho, *et all* (2009)

3.4.1 Pemodelan Beban

Pemodelan pembebanan ditunjukkan pada Gambar 3.4. Pembebanan pada sol sepatu dilakukan dalam waktu 0,08 detik. Besar beban berdasarkan berat badan rata-rata pengguna sepatu *sport* 60 kg (Jin-Rae Cho, *et all* 2009). Gambar 3.5 merupakan lokasi pengambilan data gaya reaksi dan Gambar 3.6 lokasi pengambilan data deformasi.



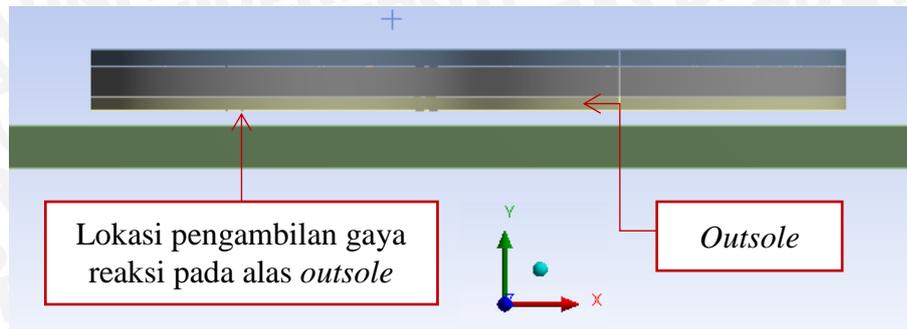
Gambar 3.4 Model pembebanan pada sol sepatu

3.5 Prosedur Penelitian

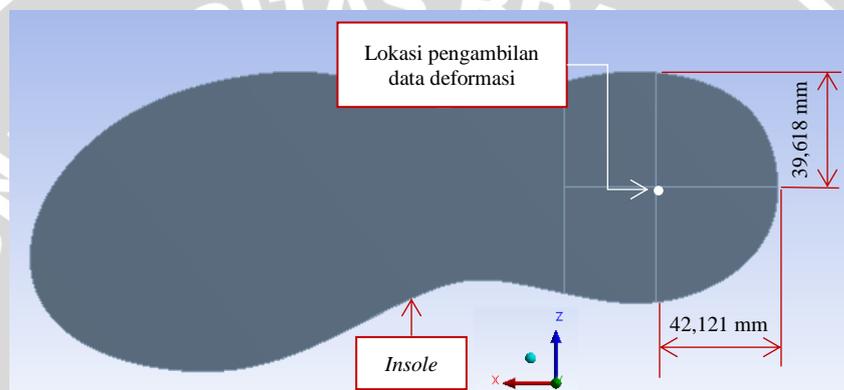
Dalam penelitian ini, prosedur penelitian dilakukan dengan urutan sebagai berikut:

1. Membuat model komponen *outsole*, *midsole*, *wave spring*, *insole*, *tissue*, *bone*, *upper* dan *ground* menggunakan bantuan *software* CAD. *Assembly* komponen model ke-1 tanpa penambahan *wave spring*. Sedangkan *Assembly* komponen model ke-2 hingga ke-10 ditambahkan *wave spring* dengan variasi *wave spring* (Tabel 3.2). Hasil dari pembuatan model ke-1 hingga ke-10 di simpan dalam bentuk file *.IGS.
2. Variasi *wave spring* ke-7 diuji dengan pembebanan tekan. Maksimal defleksi dari pengujian dengan bantuan *software* ANSYS 14.5 *Academic* dikomparasi dengan perhitungan analitis.
3. Geometri model ke-1 yang telah dibuat diimpor ke dalam *software* ANSYS 14.5 *Academic* dengan tipe analisis *Explicit Dynamic*. Setelah impor geometri model ke-1 selesai, maka dilakukan pendefinisian material untuk tiap komponen sesuai dengan Tabel 3.3 dan Tabel 3.4. Pengaturan *boundary condition* sesuai dengan Gambar 3.4 dengan lama waktu simulasi 0,08 detik. Jika pengaturan sudah sesuai, maka dilakukan proses solusi pada *software* ANSYS 14.5 *Academic*.
4. Besarnya nilai gaya reaksi model ke-1 diverifikasi terlebih dahulu dengan penelitian Jin-Rae Cho, *et all* (2009). Jika nilai gaya reaksi telah terverifikasi, maka dilanjutkan dengan pengujian pada model ke-2 hingga model ke-10.
5. Besarnya nilai gaya reaksi (Gambar 3.5) dan deformasi (Gambar 3.6) pada model ke-1 hingga ke-10 diolah dalam *software* MS.Office Exel sehingga didapatkan grafik hubungan antara deformasi dan gaya reaksi pada masing-masing variasi.

Perhitungan besarnya energi yang diserap oleh sol sepatu menggunakan metode pengukuran luasan dibawah kurva hubungan antara deformasi dan gaya reaksi.



Gambar 3.5 Lokasi pengambilan data gaya reaksi

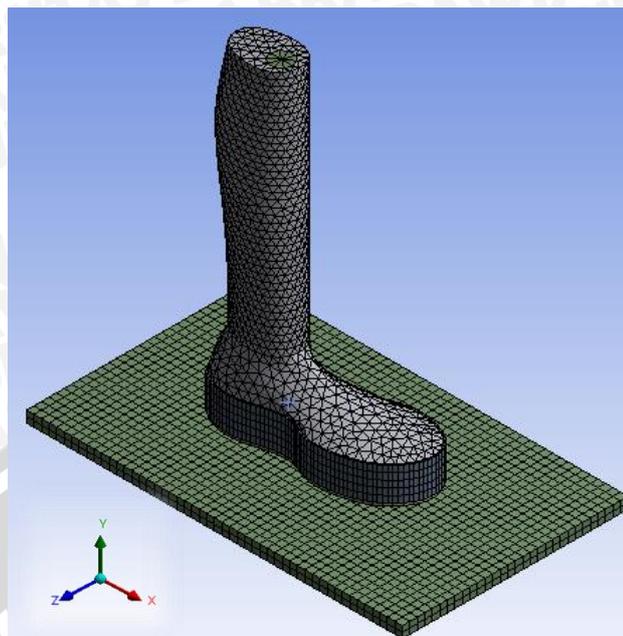


Gambar 3.6 Lokasi pengambilan data deformasi

6. Pembahasan besarnya energi yang diserap oleh masing-masing model.

3.6 Meshing

Meshing merupakan proses pembagian elemen yang tak terhingga menjadi elemen yang berhingga (terhitung). Setiap elemen terdiri dari simpul-simpul penyusun elemen (*node*). Perhitungan numerik terjadi pada *node* ini. Semakin kecil elemen yang dibentuk, maka semakin banyak pula *node* yang dihasilkan. Akibatnya, semakin besar pula persamaan matematis yang harus diselesaikan oleh *software*, sehingga kinerja komputer akan semakin berat.



Gambar 3.7 Bentuk *meshing* model uji

3.7 Langkah-langkah Simulasi pada *Software ANSYS 14.5 Academic*

Simulasi dilakukan dengan menggunakan bantuan *software ANSYS 14.5 Academic Workbench* dengan tipe analisis *Explicit Dynamic*. Secara global, proses simulasi dibagi menjadi 3 tahap, yaitu:

1. *Pre-processing*
2. *Solution*
3. *Post-processing*

3.7.1 *Pre-processing*

Pada tahap ini dilakukan proses penginputan data meliputi:

1. *Impor file* geometri variasi model yang sebelumnya sudah dibuat pada *software CAD* dan telah disimpan dalam file **.IGS*.
2. Menentukan jenis tipe analisis, dalam penelitian ini dipilih tipe analisis *Explicit Dynamic*.
3. Memasukan properti material untuk komponen *outsole, midsole, wave spring, insole, tissue, bone, upper* dan *ground*.
4. Melakukan *meshing* pada semua bodi benda kerja.
5. Menentukan pembebanan sesuai dengan Gambar 3.4.

3.7.2 *Solution*

Pada proses *solution*, seluruh inputan dari proses *pre-processing* akan diolah oleh komputer. Hasil dari *solution* akan ditampilkan dalam bentuk:

- Gaya reaksi
- Deformasi

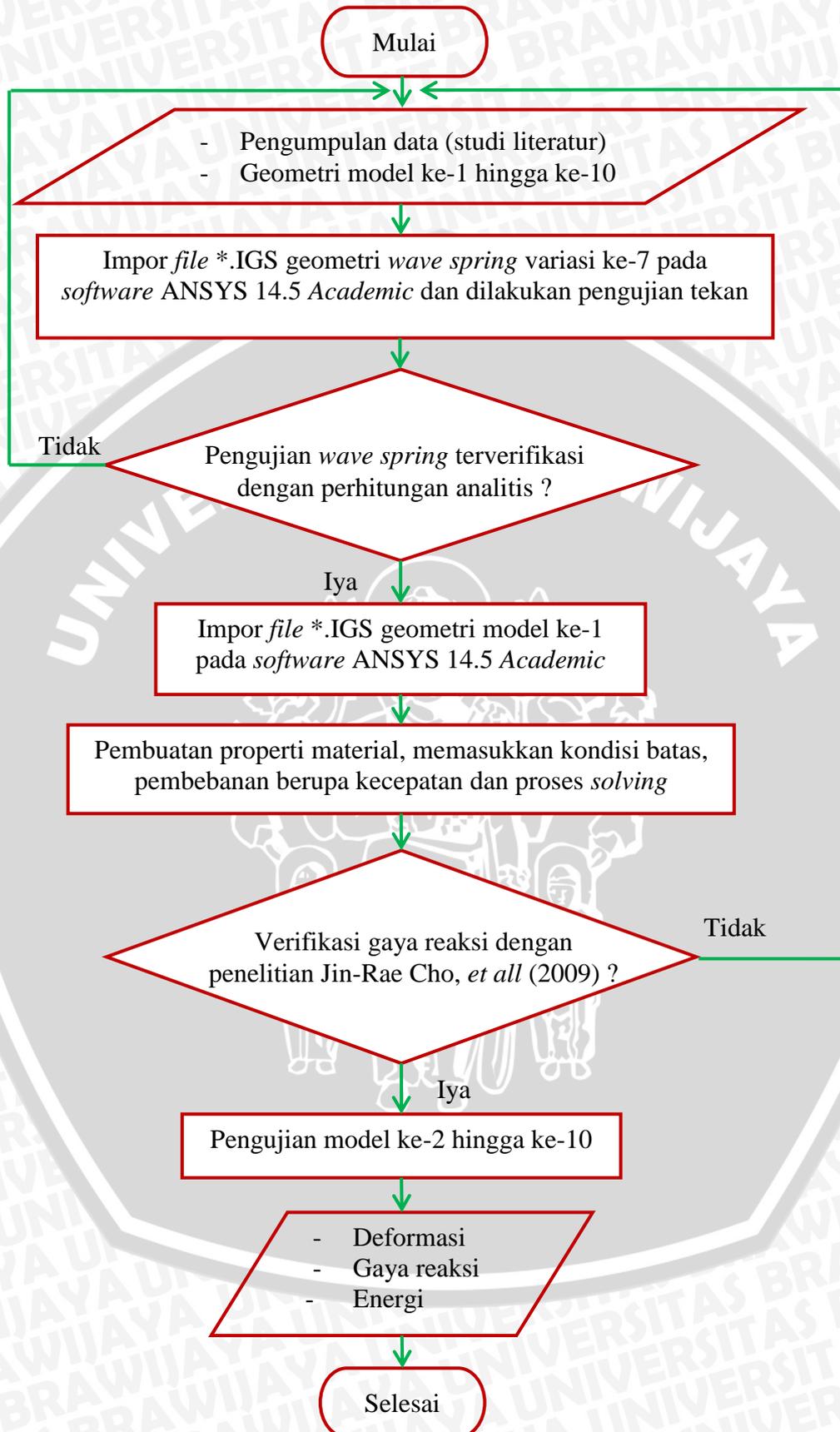
3.7.3 *Post-processing*

Menganalisa hasil dari proses simulasi yang telah dilakukan ke dalam tabel maupun grafik. Penelitian ini akan menganalisa besar energi yang diserap oleh sol sepatu.

3.8 Alur penelitian

Alur penelitian yang akan dilakukan ditunjukkan pada Gambar 3.8.





Gambar 3.8 Flowchart pengujian pemodelan sol sepatu

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Verifikasi Pengujian Tekan *Wave Spring* Dengan Perhitungan Teoritis

Besar nilai defleksi *wave spring* (f) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan persamaan 2-20. Sesuai dengan informasi geometri dan properti material pegas yang akan diteliti maka dapat direkapitulasi seperti ditunjukkan pada Tabel 4.1 dan variasi pembebanan sejumlah 5 macam sesuai dengan Tabel 4.2.

$$f = \frac{P \cdot K \cdot D_m^3}{E \cdot b \cdot t^3 \cdot N^4} \times \frac{D_{in}}{D_{out}}$$

Tabel 4.1 Informasi Geometri dan Properti Material Pegas

Simbol	Nilai	Simbol	Nilai
K	3,88	b	$4,064 \times 10^{-2}$ m
D_m	$5,3086 \times 10^{-2}$ m	E	$2,07 \times 10^{11}$ Pa
D_{in}	$4,9022 \times 10^{-2}$ m	t	$6,096 \times 10^{-4}$ m
D_{out}	$5,715 \times 10^{-2}$ m	N	4

Tabel 4.2. Variasi Pembebanan

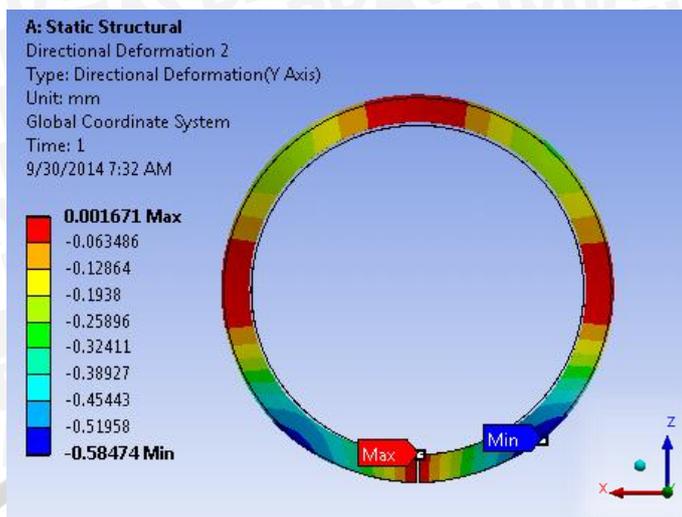
Variasi Beban (P)	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
	10 (N)	20 (N)	30 (N)	40 (N)	50 (N)

Berikut disajikan contoh perhitungan besar defleksi *wave spring* menggunakan perhitungan teoritis dengan variasi pembebanan 50 N sebagai berikut:

$$\begin{aligned} f &= \frac{P \cdot K \cdot D_m^3}{E \cdot b \cdot t^3 \cdot N^4} \times \frac{D_{in}}{D_{out}} \\ &= \frac{50 \cdot 3,88 \cdot (5,3086 \times 10^{-2})^3}{2,07 \times 10^{11} \cdot 4,064 \times 10^{-2} \cdot (6,096 \times 10^{-4})^3 \cdot 4^4} \times \frac{4,9022 \times 10^{-2}}{5,715 \times 10^{-2}} \\ &= \frac{2,902296 \times 10^{-2}}{48,7864} \times 0,8577 \\ &= 5,1068 \times 10^{-4} \text{ m} \\ &= 0,51068 \text{ mm} \end{aligned}$$

Pada proses verifikasi ini, perhitungan defleksi berdasarkan pengujian tekan dengan bantuan simulasi pada variasi pembebanan 50 N ditunjukkan pada Gambar 4.1 (pemodelan dilakukan sesuai dengan metode yang dikembangkan Arif Nugroho ; 2004). Gambar 4.1 menunjukkan besar defleksi maksimal sebesar -0,58474 mm. Tanda negatif (-) pada defleksi minimal menunjukkan *wave spring* mengalami beban tekan karena defleksi ini berlawanan dengan sumbu Y (-Y) (Gambar 4.1).





Gambar 4.1 Deformasi *wave spring* pada arah sumbu Y

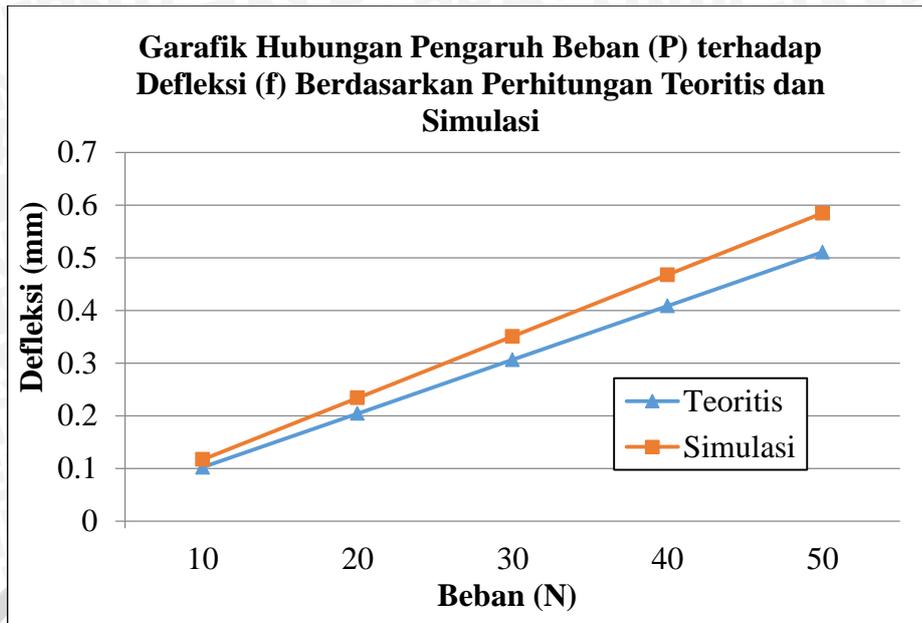
Prosentase kesalahan perhitungan teoritis dan simulasi dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \% \text{ Kesalahan} &= \frac{\text{Perhitungan Simulasi} - \text{Perhitungan Teoritis}}{\text{Perhitungan Simulasi}} \times 100\% \\ &= \frac{0,58474 - 0,51068}{0,058474} \times 100\% \\ &= 12,665 \% \end{aligned}$$

Hasil perhitungan defleksi *wave spring* berdasarkan teoritis dan simulasi dengan berbagai variasi pembebanan ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Hasil Perhitungan Defleksi *Wave Spring*

Beban (N)	Hasil Perhitungan		Presentase Kesalahan (%)
	Teoritis (mm)	Simulasi (mm)	
10	0,10214	0,11695	12,664
20	0,20427	0,2339	12,668
30	0,3064	0,35085	12,669
40	0,40854	0,46779	12,666
50	0,51068	0,58474	12,665



Gambar 4.2 Grafik hubungan pengaruh pembebanan terhadap defleksi *wave spring*

Gambar 4.2 menunjukkan grafik hubungan pembebanan terhadap defleksi *wave spring* berdasarkan perhitungan teoritis dan simulasi. Gambar 4.2 menunjukkan semakin meningkat pembebanan maka defleksi pada *wave spring* semakin meningkat pula, hal ini sesuai dengan teori defleksi *wave spring* bahwa peningkatan beban (P) berbanding lurus dengan peningkatan defleksi (f) sesuai dengan persamaan 2-20.

Karakteristik defleksi pada Gambar 4.2 mempunyai kecenderungan yang sama dengan Gambar 2.26, dimana terjadi penyimpangan antara perhitungan teoritis dan simulasi sebesar 12,6 %. Penyimpangan ini dapat disebabkan dua hal yaitu asumsi lokasi pembebanan dan tingkat kehalusan *meshing*. Penetapan lokasi pembebanan pada simulasi dilakukan pada masing-masing puncak lengkungan *wave spring*, sedangkan penetapan lokasi pada perhitungan teoritis belum diketahui informasinya. Secara umum tingkat kehalusan *meshing* berupa pengaturan jumlah elemen yang digunakan mempunyai implikasi bahwa semakin halus *meshing* maka semakin mendekati geometri struktur sehingga akan dimungkinkan penyimpangan perhitungan semakin kecil dan begitu juga sebaliknya.

4.5 Verifikasi Pengujian Model 1 (Model tanpa *Wave Spring*) Dengan Penelitian Jin-Rae Cho, *et all* (2009)

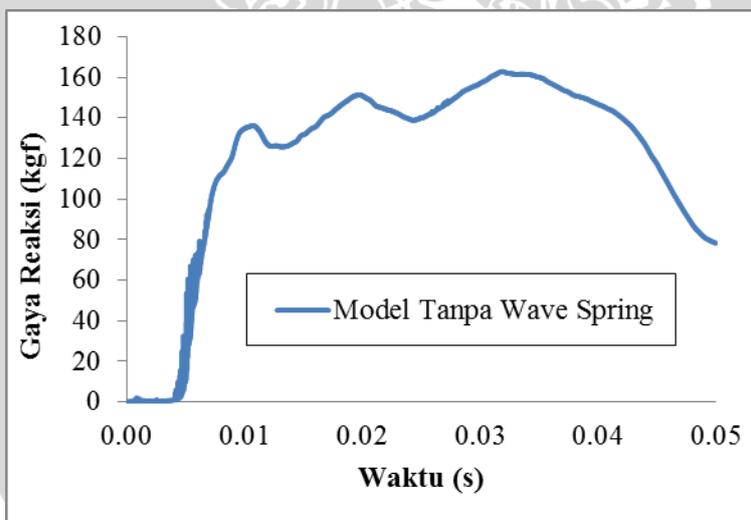
Model 1 (model tanpa *wave spring*) diuji dengan pembebanan sesuai Gambar 3.4. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya gaya reaksi pada model 1 terhadap perubahan waktu. Hasil gaya reaksi dari model 1 akan diverifikasi dengan

penelitian Jin-Rae Cho, *et all* (2009). Hasil penelitian Jin-Rae Cho, *et all* (2009) sesuai dengan Gambar 2.2.

Gambar 2.2 merupakan grafik hubungan antara gaya reaksi dan waktu pembebanan dengan menggunakan metode eksperimen dan menggunakan bantuan *software* FEM (Jin-Rae Cho, *et all* 2009). Grafik tersebut menunjukkan peningkatan gaya reaksi terhadap perubahan waktu. Besar gaya reaksi mencapai titik maksimum yaitu sebesar 148 kgf pada waktu 0,036 s. Peningkatan besar gaya reaksi ini sesuai teori *impuls* dan *momentum*. Peningkatan *momentum* berbanding lurus dengan peningkatan *impuls*.

$$\int_{t_1}^{t_2} P dt = \int_{v_1}^{v_2} m dv$$

Ketika sol sepatu kontak dengan *ground*, maka terdapat gaya reaksi pada sol sepatu dengan selang waktu tertentu. Semakin lama waktu kontak sol sepatu, maka massa yang diterima oleh sol sepatu semakin besar. Akibatnya *momentum* meningkat dan besarnya *impuls* akan meningkat pula. Jika besar *impuls* meningkat, maka akan diikuti peningkatan gaya reaksi pula.



Gambar 4.3 Grafik hubungan gaya reaksi dan waktu pembebanan pada model 1

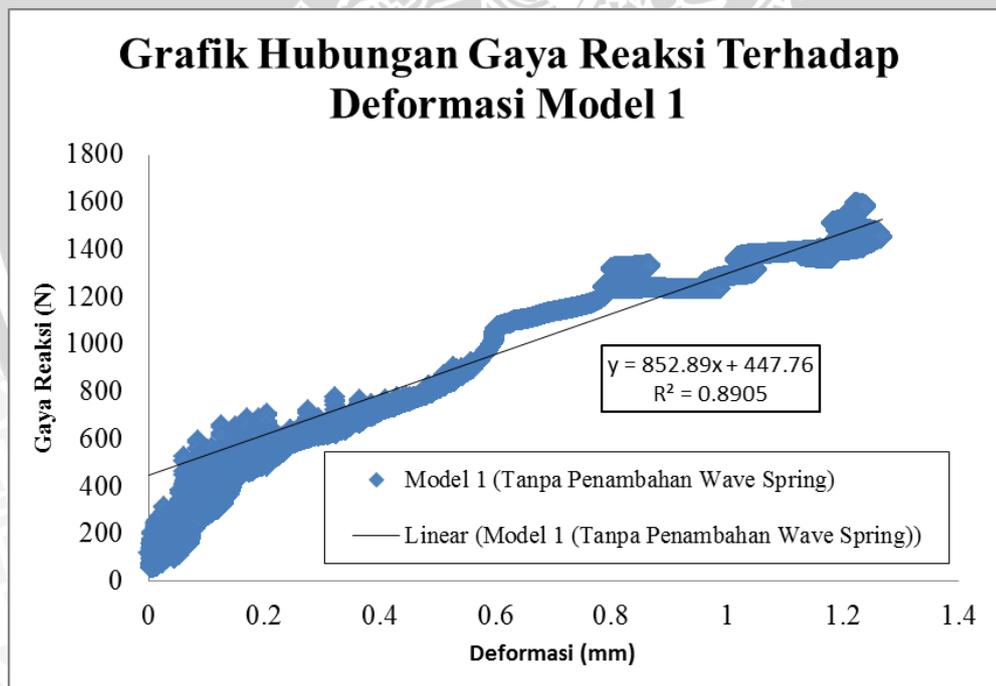
Gaya reaksi pada pengujian model 1 (Gambar 4.3) mencapai titik maksimum sebesar 162,773 kgf pada waktu 0,031 s. Hasil pengujian model 1 memiliki kecenderungan peningkatan besar gaya reaksi yang sama dengan penelitian Jin-Rae Cho, *et all* 2009. Akan tetapi, pada hasil pengujian model 1 terjadi fluktuasi sebelum mencapai titik maksimum. Hal ini disebabkan pada penelitian sebelumnya informasi model pembebanan belum terlalu detail khususnya penempatan lokasi pembebanan. Pada model 1 penempatan lokasi pembebanan dilakukan berdasarkan asumsi

transformasi model yang diletakkan pada *center of gravity* kaki. Jika *center of gravity* kaki dan *center of gravity* model keseluruhan tidak pada satu sumbu, maka akan terjadi beban momen (beban berlebih) ketika *sol* sepatu kontak dengan *ground*. Hal ini yang menyebabkan adanya perbedaan besar gaya reaksi khususnya pada rentang data waktu 0,01 – 0,025 detik.

4.6 Pengaruh Ketebalan dan *Diameter* Dalam *Wave Spring* Terhadap Besar Penyerapan Energi Sol Sepatu *Sport*

Ketebalan dan *diameter* dalam *wave spring* merupakan faktor utama yang mempengaruhi besar penyerapan energi. Pada penelitian ini, didapatkan data berupa besar deformasi dan gaya reaksi terhadap lama pembebanan. Deformasi dan gaya reaksi pada masing-masing model ditentukan setelah sol sepatu kontak dengan *ground*.

Energi regangan (*strain* energi) merupakan hubungan antara besar gaya reaksi (P) terhadap pertambahan deformasi. Hubungan gaya reaksi dan deformasi pada model 1 (Gambar 4.4) dibuat dari 2 grafik yaitu grafik hubungan deformasi terhadap waktu pembebanan dan grafik hubungan gaya reaksi terhadap waktu pembebanan. Besar energi pada model 1 akan dibandingkan dengan besar energi model 2 hingga model 10.



Gambar 4.4 Grafik hubungan gaya reaksi terhadap deformasi pada model 1

Pemodelan material pada pengujian ini hanya memasukkan sifat properti material elastis (*density*, modulus elastisitas dan *poison's ratio*), sehingga peningkatan beban pada masing-masing model berbanding lurus dengan peningkatan deformasi. Sebaran data hubungan gaya reaksi terhadap deformasi pada Gambar 4.4 menunjukkan

kecederungan linier, hal ini membuktikan bahwa peningkatan gaya reaksi pengujian model 1 berbanding lurus dengan peningkatan deformasi yang juga sesuai dengan hubungan antara defleksi dan pembebanan pada persamaan yang dipakai untuk *wave spring*. Penyerapan energi maksimal model 1 dihitung berdasarkan deformasi maksimal ketika model 1 mendapat beban maksimal. Luas area di bawah kemiringan kurva hubungan gaya reaksi terhadap deformasi merupakan total energi yang mampu diserap oleh sol sepatu model 1, sehingga untuk merancang penyerapan energi yang lebih besar diperlukan sudut kemiringan kurva yang lebih besar pula dengan catatan setiap model mempunyai deformasi yang sama. Penyerapan energi pada masing-masing model dihitung dengan persamaan 2-5:

$$U = \int_{x_0}^{x_1} P dx$$

U merupakan besar energi regangan (Joule), P merupakan beban maksimum (N), x_0 merupakan deformasi awal (m) dan x_1 merupakan deformasi ketika beban maksimum (m). Berikut ini ditampilkan contoh perhitungan penyerapan energi pada model 1:

Diketahui:

$$P_{\max} : 1595,392 \text{ N}$$

$$\text{Deformasi max} : 1,22031 \text{ mm}$$

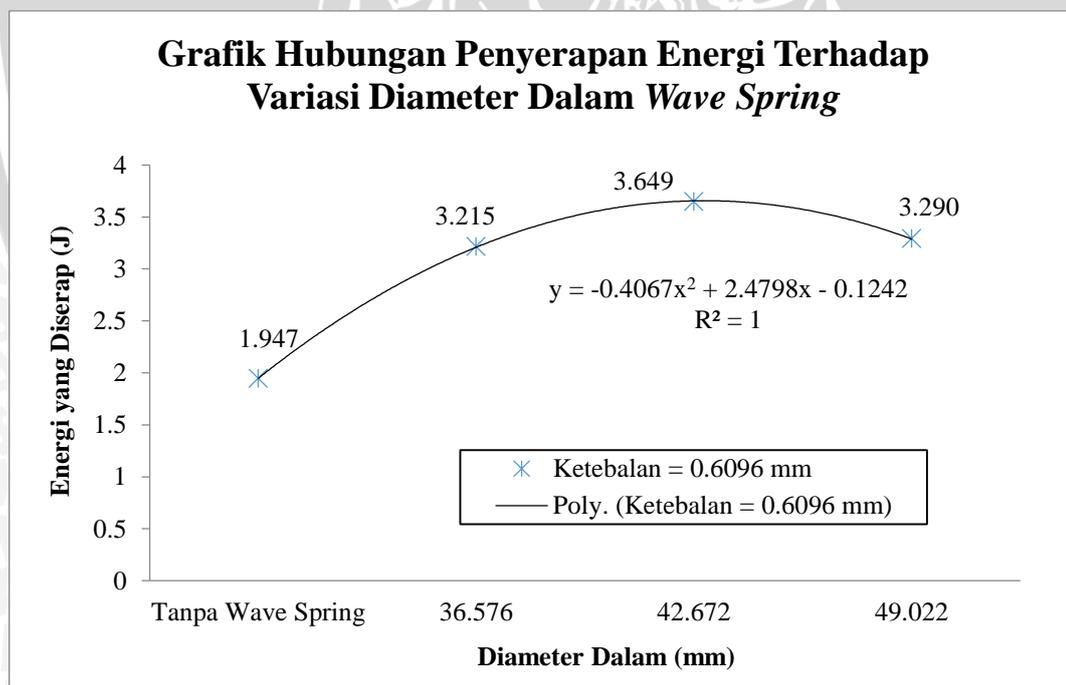
$$\begin{aligned} U &= \int_{x_0}^{x_1} P dx = P (x_1 - x_0) \\ &= 1595,392 (1,22031 - 0) \\ &= 1946,872812 \text{ mJ} \\ &= 1,946872812 \text{ J} \end{aligned}$$

Hasil dari perhitungan penyerapan energi pada masing-masing model ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Nilai Penyerapan Energi pada Variasi Model

Model	D_{in} (mm)	Tebal (t) (mm)	Gaya reaksi (N)	Deformasi (mm)	Energi (Joule)
1	(desain tanpa <i>wave spring</i>)		1595,392	1,22031	1,946872812
2	36,576	0,6096	1710,35	1,879505	3,214611377
3	36,576	0,762	1695,796	1,825819	3,096216557
4	36,576	0,8128	1712,184	1,86826	3,19880488
5	42,672	0,6096	1713,941	2,128948	3,648891264
6	42,672	0,762	1712,359	1,869277	3,200873294
7	42,672	0,8128	1710,789	1,850546	3,165893741
8	49,022	0,6096	1722,37	1,910085	3,289873101
9	49,022	0,762	1713,741	1,895779	3,248874199
10	49,022	0,8128	1710,542	1,85575	3,174338317

Dari Tabel 4.4. dapat dibuat grafik hubungan antara besar energi terhadap variasi model. Gambar 4.5 menunjukkan grafik hubungan antara penyerapan energi terhadap variasi *diameter* dalam *wave spring* (model 2, 5 dan 8) dengan ketebalan 0,6096 mm, sedangkan Gambar 4.8 menunjukkan grafik hubungan antara penyerapan energi terhadap variasi ketebalan *wave spring* (model 2, 3 dan 4) dengan *diameter* dalam 36,576 mm.



Gambar 4.5 Grafik hubungan penyerapan energi terhadap variasi *diameter* dalam *wave spring*

Gambar 4.5 menunjukkan penyerapan energi pada variasi *diameter* dalam 36,576; 42,672; 49,022 mm yaitu: 3,214611377; 3,648891264; 3,289873101 Joule (Tabel 4.4.). Penyerapan energi ini dipengaruhi oleh *diameter* dalam (D_{in}) *wave spring*

pada setiap model. Semakin besar nilai *diameter* dalam, maka luas area penampang *wave spring* semakin kecil. Penurunan luas area tersebut menurunkan besar *moment of inertia wave spring*, akibatnya tegangan maksimal yang diterima *wave spring* akan semakin meningkat. Hal ini sesuai dengan persamaan 2-17 dan 2-18.

$$I_x = \int y^2 dA = \bar{I}_x = \int_{-h/2}^{h/2} y^2 b dy = \frac{bh^3}{12}$$

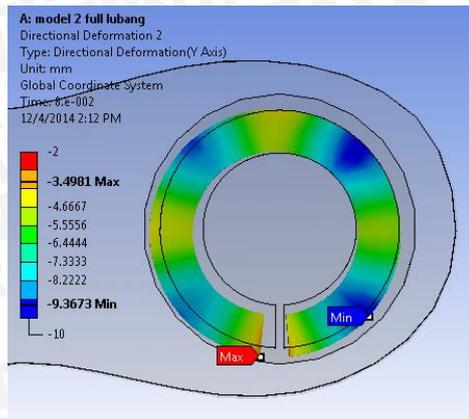
$$\sigma_m = \frac{M.c}{I}$$

Jika tegangan maksimal yang diterima *wave spring* semakin meningkat, maka besar energi yang diserap *wave spring* akan meningkat pula. Hal ini sesuai dengan persamaan energi 2-21 dan 2-22. Peningkatan besar *diameter* dalam (D_{in}) dan tegangan (σ) *wave spring* berbanding lurus dengan peningkatan besar energi.

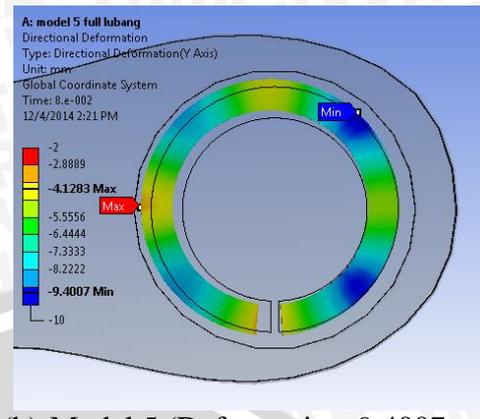
$$U = \frac{1}{2} k(x_1^2 - x_0^2) = \frac{1}{2} k \cdot f = \frac{1}{2} k \left(\frac{P \cdot K \cdot D_m^3}{E \cdot b \cdot t^3 \cdot N^4} \times \frac{D_{in}}{D_{out}} \right)$$

$$U = \frac{\sigma^2}{2E} V = \frac{S^2}{2E} V = \frac{\left(\frac{3\pi \cdot P \cdot D_m}{4 \cdot b \cdot t^2 \cdot N^2} \right)^2}{2E} V = \left(\frac{3\pi \cdot P \cdot D_m}{4 \cdot b \cdot t^2 \cdot N^2} \right)^2 \frac{V}{2E}$$

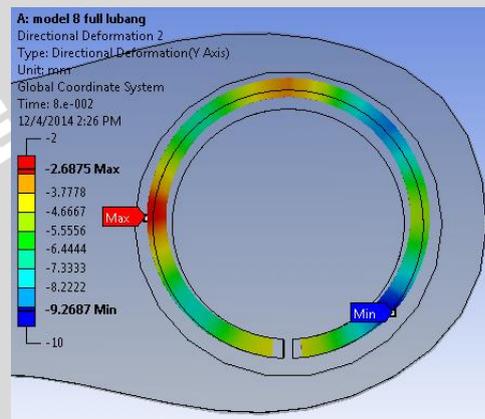
Terjadi penurunan penyerapan energi pada variasi *diameter* dalam *wave spring* 49,022 mm, hal ini disebabkan terjadinya penurunan deformasi *wave spring* berlawanan arah sumbu Y (-Y). Deformasi *wave spring* berlawanan arah sumbu Y model 8 yaitu: -9,2687 mm. Deformasi *wave spring* model 8 lebih kecil dibandingkan dengan deformasi *wave spring* model 5 yaitu: -9,4007 mm (Gambar 4.6). Selain itu, deformasi berlawanan arah sumbu Y pada *midsole* model 8 sebesar -5,3481 mm, deformasi tersebut lebih kecil dibandingkan dengan model 5 yaitu: -5,4015 mm (Gambar 4.7), sehingga dimungkinkan terjadinya slip pada *wave spring* model 8, hal ini juga dibuktikan dengan pola deformasi *wave spring* yang berbeda pada setiap model (Gambar 4.6).



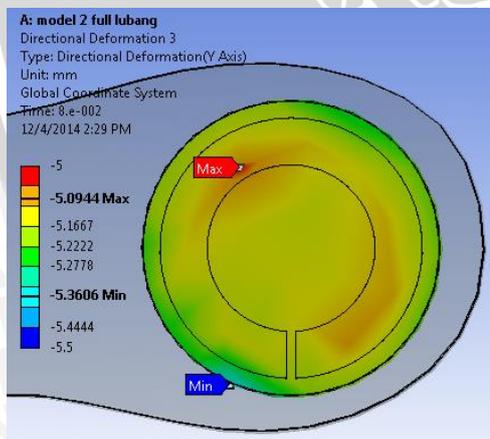
(a) Model 2 (Deformasi = -9,3673 mm)



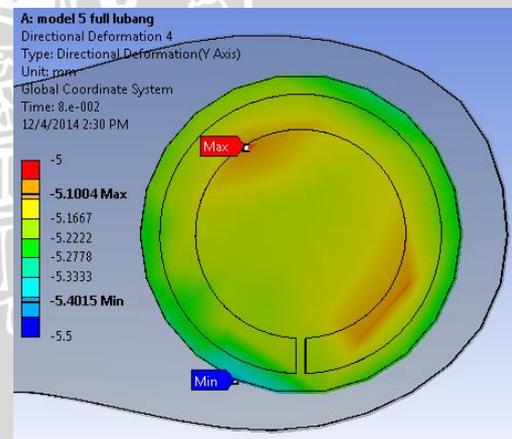
(b) Model 5 (Deformasi = -9,4007 mm)



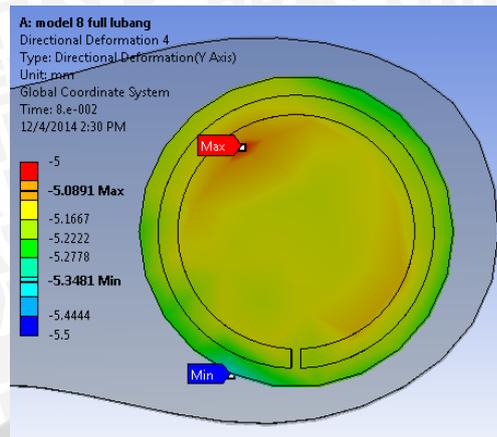
(c) Model 8 (Deformasi = -9,2687 mm)

Gambar 4.6 Deformasi *wave spring* berlawanan arah sumbu Y (-Y) model 2, 5 dan 8

(a) Model 2 (Deformasi = -5,3606 mm)



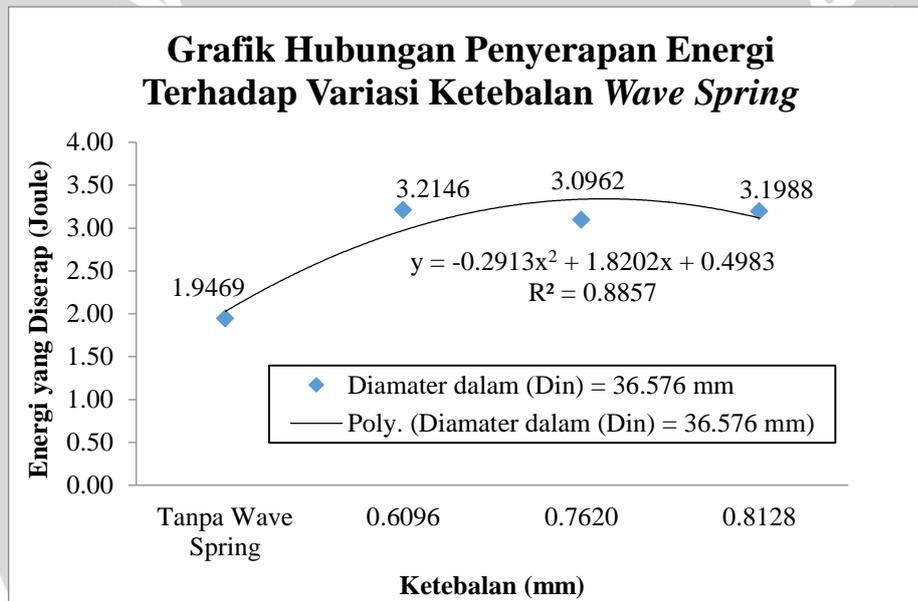
(b) Model 5 (Deformasi = -5,4015 mm)



(c) Model 8 (Deformasi = -5,3481 mm)

Gambar 4.7 Deformasi *midsole* berlawanan arah sumbu Y (-Y) model 2, 5 dan 8

Gambar 4.8 menunjukkan grafik hubungan antara besar energi terhadap variasi ketebalan *wave spring* yang berbeda.



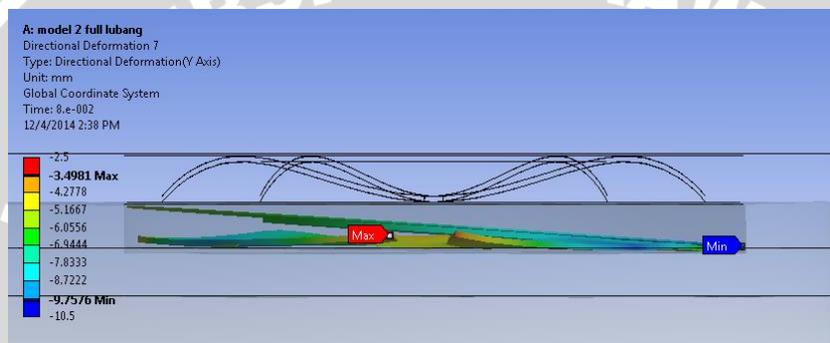
Gambar 4.8 Grafik hubungan penyerapan energi terhadap variasi ketebalan *wave spring*

Gambar 4.8 menunjukkan penyerapan energi terjadi pada variasi ketebalan 0,6096; 0,7620; 0,8128 mm, yaitu: 3,214611377; 3,096216557; 3,19880488 Joule (Tabel 4.4.). Penyerapan energi ini dipengaruhi oleh ketebalan *wave spring* pada setiap model. Semakin besar nilai ketebalan *wave spring*, maka luas area penampang *wave spring* semakin besar pula. Peningkatan luas area tersebut meningkatkan besar *moment of inertia wave spring*, akibatnya tegangan maksimal yang diterima *wave spring* akan semakin kecil sehingga penyerapan energi akan semakin kecil pula. Hal ini sesuai dengan persamaan 2-22. Peningkatan nilai ketebalan (t) dan penurunan besar tegangan (σ) *wave spring* menurunkan besar penyerapan energi.

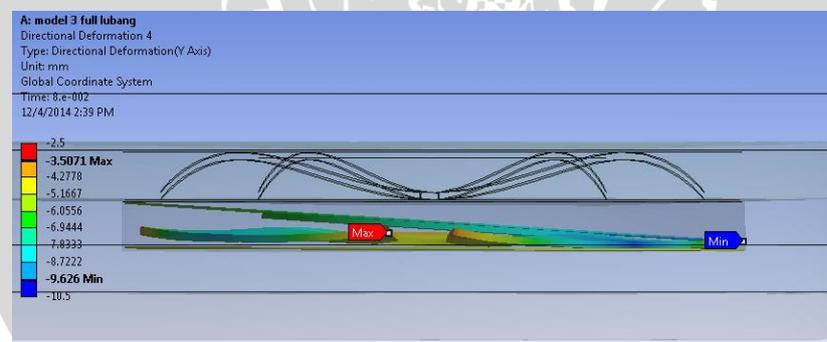


$$U = \frac{\sigma^2}{2E} V = \frac{S^2}{2E} V = \frac{\left(\frac{3\pi \cdot P \cdot D_m}{4 \cdot b \cdot t^2 \cdot N^2} \right)^2}{2E} V = \left(\frac{3\pi \cdot P \cdot D_m}{4 \cdot b \cdot t^2 \cdot N^2} \right)^2 \frac{V}{2E}$$

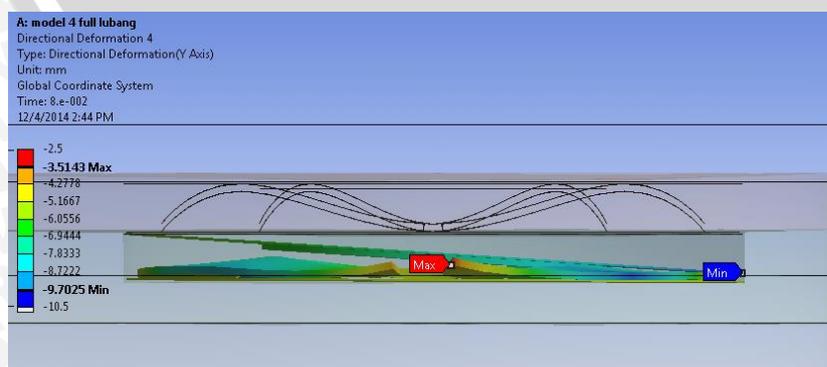
Terjadi peningkatan penyerapan energi pada variasi ketebalan *wave spring* 0,8128 mm. Peningkatan ini disebabkan pembebanan yang tidak merata pada *wave spring* (Gambar 4.9), sehingga dimungkinkan terjadi slip yang lebih besar pada model 4. Hal ini juga dibuktikan dengan pola deformasi penekan *wave spring* yang tidak merata (Gambar 4.9). Gambar 4.9 menunjukkan deformasi *wave spring* berlawanan arah sumbu Y (-Y) model 4 lebih besar dibandingkan dengan model 3. Selain itu, peningkatan deformasi pada *midsole* model 4 lebih besar dibandingkan dengan model 3 (Gambar 4.10).



(a) Model 2 (Deformasi = -9,7576 mm)

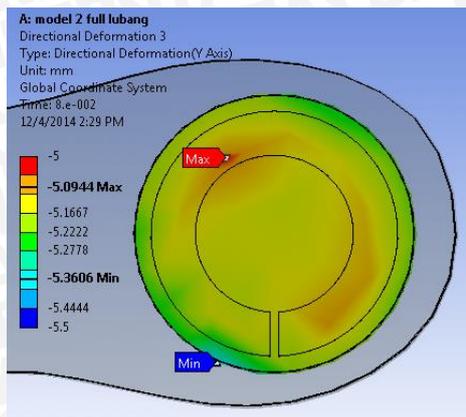


(b) Model 3 (Deformasi = -9,626 mm)

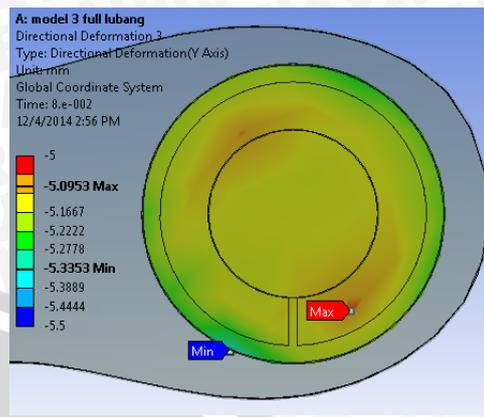


(c) Model 4 (Deformasi = -9,7025 mm)

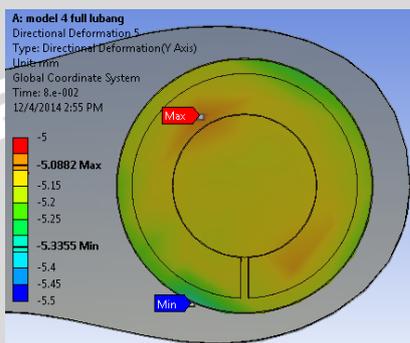
Gambar 4.9 Ketidak merataan pembebanan *wave spring*



(a) Model 2 (Deformasi = -5,3606 mm)



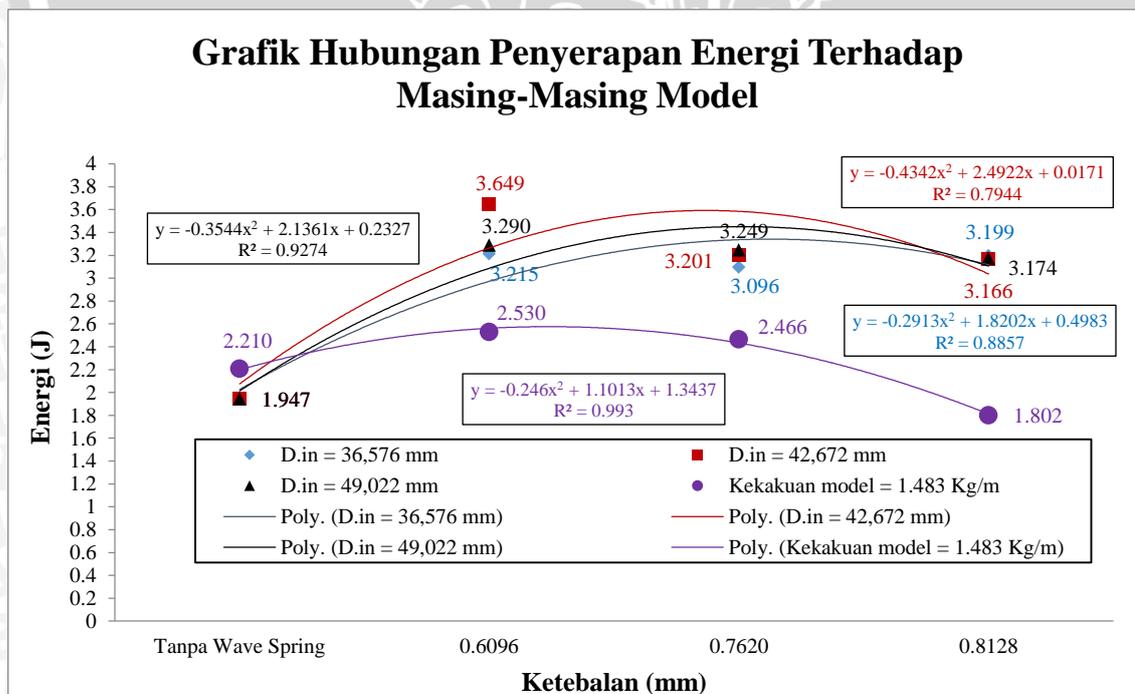
(b) Model 3 (Deformasi = -5,3353 mm)



(c) Model 4 (Deformasi = -5,3481 mm)

Gambar 4.10 Deformasi *midsole* berlawanan arah sumbu Y (-Y) model 2, 3 dan 4

4.7 Pengaruh Ketebalan *Wave Spring* Terhadap Penyerapan Energi Pada Variasi Model



Gambar 4.11 Grafik hubungan penyerapan energi terhadap variasi ketebalan dan diameter dalam *wave spring*



Gambar 4.11 menunjukkan penyerapan energi pada model 1 hingga model 10. Gambar 4.11 menunjukkan bahwa ketebalan dan *diameter* dalam *wave spring* berpengaruh pada penyerapan energi pada sol sepatu. Penyerapan energi model 2 hingga model 10 lebih besar dibandingkan dengan penyerapan energi model 1. Hal ini disebabkan karena material *midsole* yang dihilangkan untuk ruang kerja *wave spring* merupakan material *solid* (pejal) (Gambar 4.12). Ketika model 1 mendapat pembebanan maka deformasi pada model 1 lebih kecil dibandingkan dengan model 2 hingga model 10 (Tabel 4.4.). Selain itu, gaya reaksi pada model 1 lebih kecil dibandingkan dengan model 2 hingga model 10. Hal ini membuktikan bahwa material *solid* (pejal) lebih sulit untuk terdeformasi.



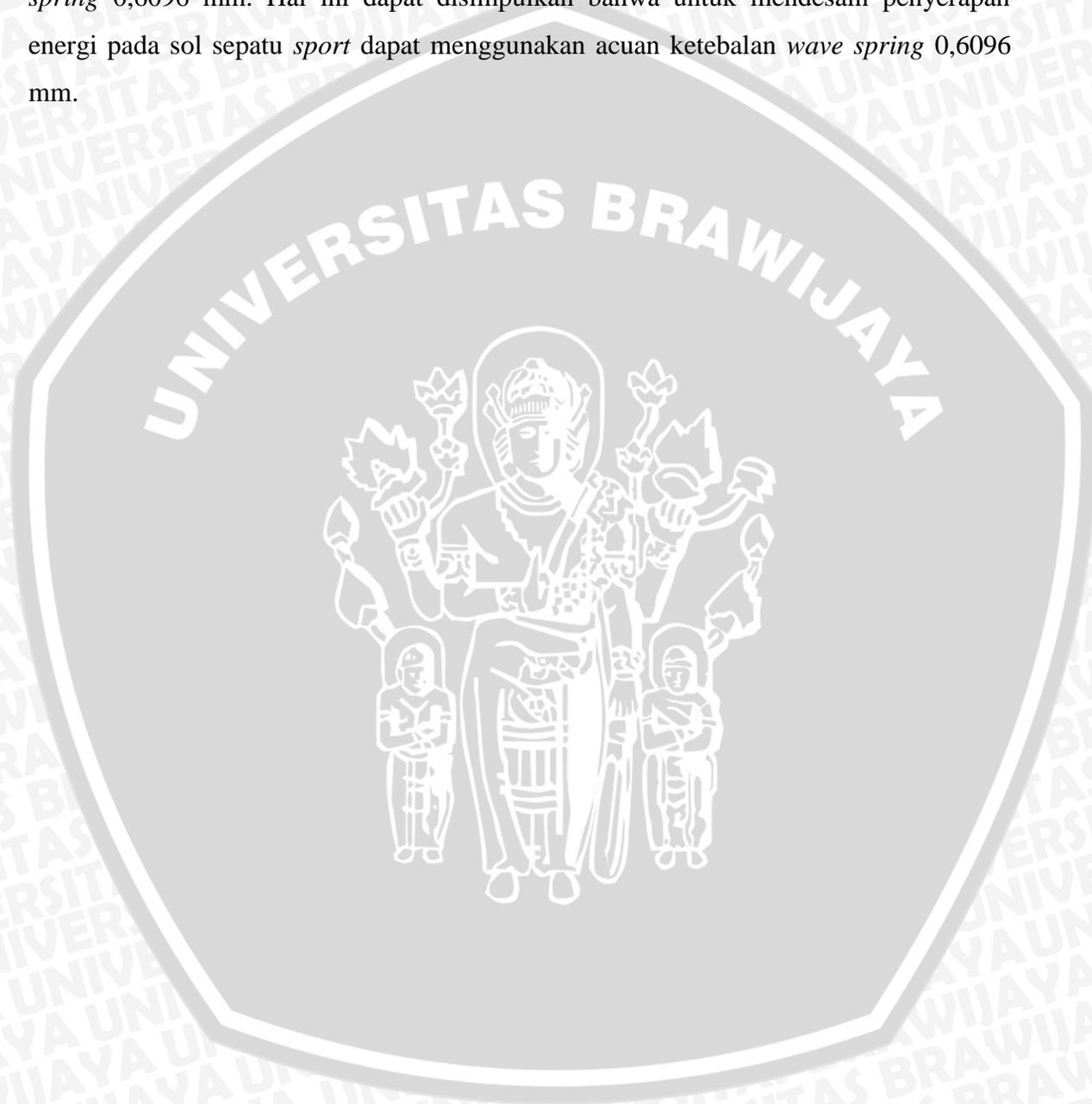
Gambar 4.12 Geometri *midsole* pada variasi model 1 dan model *midsole* dengan ruang kerja *wave spring*

Semakin besar penambahan ketebalan *wave spring* pada variasi *diameter* dalam *wave spring* 42,672 dan 49,022 mm mengakibatkan penurunan penyerapan energi sol sepatu *sport*. Penyerapan energi pada variasi *diameter* dalam *wave spring* 42,672 mm yaitu: 3,648891264; 3,200873294; 3,165893741 Joule dan 3,289873101; 3,248874199; 3,174338317 Joule pada variasi *diameter* dalam *wave spring* 49,022 mm (Tabel 4.4.). Semakin besar nilai ketebalan *wave spring*, maka luas area penampang *wave spring* semakin besar pula. Peningkatan luas area tersebut meningkatkan besar *moment of inertia wave spring*, akibatnya tegangan maksimal yang diterima *wave spring* akan semakin kecil sehingga penyerapan energi akan semakin pula. Hal ini sesuai dengan persamaan 2-22. Peningkatan nilai ketebalan (t) dan penurunan besar tegangan (σ) *wave spring* menurunkan besar penyerapan energi.

$$U = \frac{\sigma^2}{2E} V = \frac{S^2}{2E} V = \frac{\left(\frac{3\pi \cdot P \cdot D_m}{4 \cdot b \cdot t^2 \cdot N^2} \right)^2}{2E} V = \left(\frac{3\pi \cdot P \cdot D_m}{4 \cdot b \cdot t^2 \cdot N^2} \right)^2 \frac{V}{2E}$$

Penyerapan energi pada variasi ketebalan *wave spring* 0,762 dan 0,8128 mm tidak menunjukkan peningkatan yang signifikan. Jika variasi ketebalan *wave spring* diperbesar lagi, maka dimungkinkan penyerapan energi pada masing-masing variasi

diameter dalam *wave spring* akan sama. Akan tetapi, pada variasi ketebalan 0,6096 menunjukkan peningkatan penyerapan energi yang signifikan. Secara berurutan penyerapan energi pada variasi *diameter* dalam *wave spring* 36,576; 42,672; 49,022 mm yaitu: 3,214611377; 3,648891264; 3,289873101 Joule. Penyerapan energi tertinggi dialami oleh variasi *diameter* dalam *wave spring* 42,672 mm dengan ketebalan *wave spring* 0,6096 mm. Hal ini dapat disimpulkan bahwa untuk mendesain penyerapan energi pada sol sepatu *sport* dapat menggunakan acuan ketebalan *wave spring* 0,6096 mm.



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Peningkatan besar *diameter* dalam *wave spring* dapat memperbesar penyerapan energi pada sol sepatu *sport*.
2. Penurunan ketebalan *wave spring* dapat meningkatkan besar penyerapan energi pada sol sepatu *sport*.

5.2 Saran

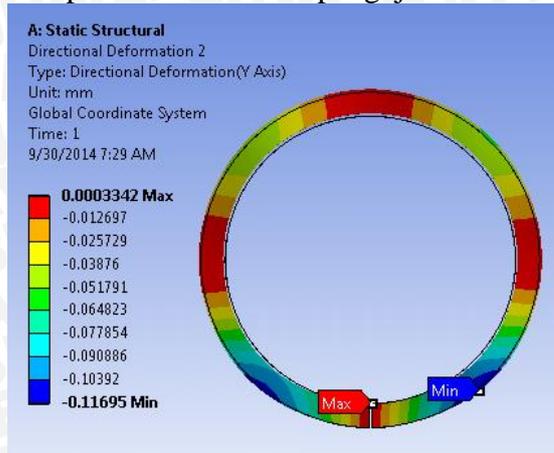
1. Dapat dikembangkan penelitian untuk memvariasikan tipe dan jenis material *wave spring* yang berbeda.
2. Hasil penelitian ini perlu dilanjutkan dengan metode eksperimental nyata agar dapat dikembangkan untuk dibuat produk sepatu.



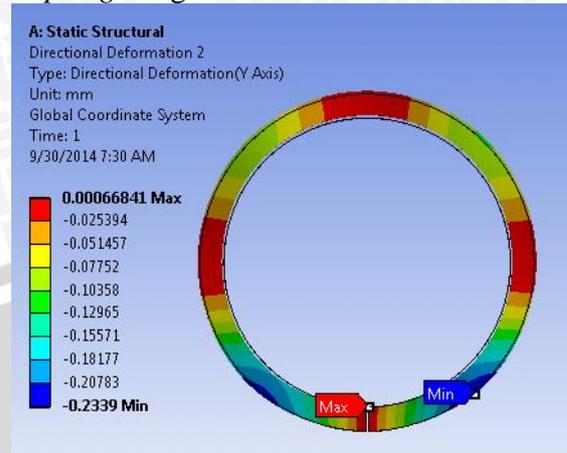
DAFTAR PUSTAKA

- Ferdinand P, Beer et all. 2012. *Mechanics Of Materials Sixth Edition*. New York: Mc Graw-Hill.
- Grandin, Hartley. 1986. *Fundamentals Of The Finite Element Method*. New York: Macmillan Publishing Company.
- Meriam J.L and L.G Kraige. 2002. *Engineering Mechanic Static*. United State of America.
- Nugroho Arif. 2004. *Analisis Karakteristik Wave Springs Tipe Gap Dengan Metode Elemen Hingga*. Malang: Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
- Rae-Jin Cho, Seung-Bum Park, et all. 2009. *Landing Impact Analysis Of Sports Shoes Using 3-D Coupledfoot-Shoe Finite Element Model*. Journal of Mechanical Science and Technology.
- Smalley Steel Ring Company. 2011. *Engineering & Parts Catalog*. Europe.
- Zemansky Sears. 1962. *Fisika untuk Universitas 1*. Jakarta: Yayasan Dana Buku Indonesia.
- Anonymous* 1. <http://www.zalora.co.id/men/sports/basketball/?sort=popularity&dir=desc>. (Diakses Tanggal 10 Juni 2014 pukul 09.00 Wib)
- Anonymous* 2. <http://www.volleyballcentral.net/mizuno-wave-tornado-7-men-s-volleyball-shoes.html>. (Diakses Tanggal 12 Juni 2014 pukul 08.00 Wib)
- Anonymous* 3. <http://www.evatane.com/enkey-features-brand-benefits-conventional-structuresindex.html>. (Diakses Tanggal 15 Juli 2014 pukul 011.30 Wib)

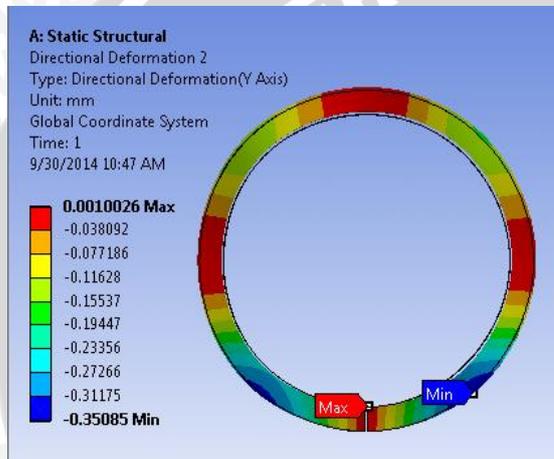
Lampiran 1: Deformasi pengujian tekan *wave spring* dengan metode simulasi



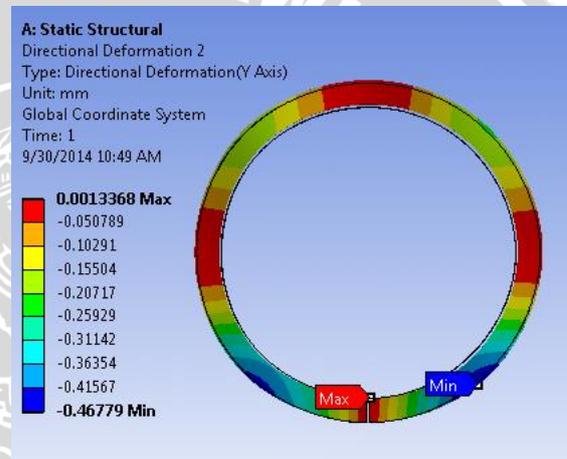
Variasi Beban 10 N
(Deformasi : -0,11695 mm)



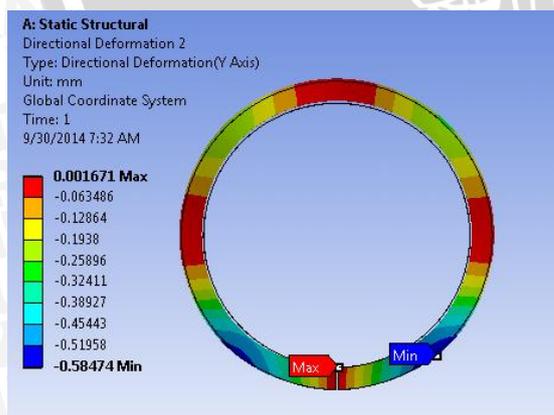
Variasi Beban 20 N
(Deformasi : -0,2339 mm)



Variasi Beban 30 N
(Deformasi : -0,35085 mm)



Variasi Beban 40 N
(Deformasi : -0,46779 mm)



Variasi Beban 50 N
(Deformasi : -0,58474 mm)

