



UNIVERSITAS DIPONEGORO

**SIMULASI SISTEM MEKANIS KARDIOVASKULER
BERDASARKAN MODEL TEKANAN–ALIRAN
KONDISI ISTIRAHAT**

TUGAS AKHIR

**DIMAS PRIMASATYA
L2E 006 030**

**FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN**

**SEMARANG
DESEMBER 2010**

TUGAS SARJANA

- Diberikan kepada : Nama : Dimas Primasatya
NIM : L2E 006 030
- Dosen Pembimbing : Dr. Ing. Ir. Ismoyo Haryanto, MT
- Jangka Waktu : 6 (enam) bulan
- Judul : SIMULASI SISTEM MEKANIS KARDIOVASKULER
BERDASARKAN MODEL TEKANAN-ALIRAN KONDISI
ISTIRAHAT
- Isi Tugas :
1. Memodelkan dan mensimulasikan sistem mekanis kardiovaskuler tubuh manusia kondisi istirahat.
 2. Membangun blok fungsi dari suatu sistem mekanis kardiovaskuler dengan menggunakan bantuan *toolbox Simulink* dari program Matlab R2008b.
 3. Analisa karakteristik sistem mekanis kardiovaskuler pada tubuh manusia berupa grafik gelombang tekanan, aliran dan volume berdasarkan model tekanan-aliran pada kondisi istirahat.

Semarang, 23 Desember 2010

Menyetujui,

Dosen Pembimbing



Dr. Ing Ir. Ismoyo Haryanto, MT
NIP: 196605212006041010

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi/Tesis/Disertasi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun yang dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

NAMA : Dimas Primasatya

NIM : L2E 006 030

Tanda Tangan :



Tanggal : 23 Desember 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
NAMA : Dimas Primasatya
NIM : L2E 006 030
Jurusan/Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Simulasi Sistem Mekanis Kaerdiovaskuler Berdasarkan Model Tekanan–Aliran Kondisi Istirahat

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan/Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.

TIM PENGUJI

Pembimbing	: Dr. Ing. Ir. Ismoyo Haryanto, MT	()
Penguji	: Dr. Rusnaldy, ST, MT	()
Penguji	: Ir. Eflita Yohana, MT	()
Penguji	: Dr. Jamari, ST, MT	()

Semarang, 23 Desember 2010

Jurusan Teknik Mesin
Ketua,



Dr. Ir. Dipl. Ing. Berkah Fajar TK
NIP. 1959072219870310003

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademika Universitas Diponegoro, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : DIMAS PRIMASATYA
NIM : L2E 006 030
Jurusan/Program Studi : TEKNIK MESIN
Fakultas : TEKNIK
Jenis Karya : SKRIPSI

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Diponegoro **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*None-exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :


Simulasi Sistem Mekanis Kardiovaskuler Berdasarkan Model Tekanan–Aliran Kondisi Istirahat

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti/Noneksklusif ini Universitas Diponegoro berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Semarang
Pada Tanggal : 23 Desember 2010

Yang menyatakan



(DIMAS PRIMASATYA)
NIM: L2E006030

ABSTRAK

Metode pengukuran non-invasif telah membuat perkembangan pesat dalam bidang penelitian teknik biomedikal salah satunya adalah impedansi kardiografi (ICG) yang mampu menyediakan informasi dasar denyutan. Dengan mengetahui teknik pengukuran seperti ini akan membantu dalam pemeriksaan kondisi fisiologis dari pasien yang berhubungan dengan sistem kardiovaskuler.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik sistem mekanis kardiovaskuler pada tubuh manusia berupa grafik gelombang tekanan, aliran dan volume berdasarkan model tekanan–aliran pada kondisi istirahat, serta menganalisa hasil simulasi dengan mengimplementasikan keadaan fisiologi berupa penyakit kardiovaskuler yaitu hipertensi dan jantung koroner. Untuk mendapatkan grafik gelombang tersebut yaitu dengan memodelkan sistem kardiovaskuler menggunakan metode parameter tergumpal (*lumped*), menyusun persamaan differensial dari persamaan dinamika tekanan–aliran fluida mampat dalam segmen silinder tabung elastis dan mensimulasikan model menggunakan bantuan *toolbox Simulink* Matlab R2008b.

Simulasi dengan metode parameter tergumpal (*lumped*) ini menghasilkan grafik gelombang tekanan, aliran dan volume keadaan fisiologis seseorang pada kondisi istirahat, yaitu tekanan ventrikel kiri 120 mmHg , tekanan ventrikel kanan 30 mmHg , aliran keluar ventrikel kiri 800 mL/sek dan volume di ventrikel kiri 160 mL . Dengan mengimplementasikan simulasi yang telah dikembangkan pada keadaan fisiologis penyakit kardiovaskuler, hipertensi terjadi pada saat tahanan pembuluh arteri $R_{3i} = 0.61 \text{ mmHg}\cdot\text{s/mL}$ dengan tekanan ventrikel kiri 145 mmHg . Sedangkan untuk kondisi jantung koroner, tekanan ventrikel mengalami penurunan hingga menjadi 82 mmHg pada nilai tahanan pembuluh arteri $R_{3o} = 0.852 \text{ mmHg}\cdot\text{s/mL}$. Penelitian ini mengasumsikan jantung bersifat pasif karena tidak ada sinyal umpan balik yang dapat mengkompensasi jika tekanan pada sirkulasi sistemik berkurang.

Penelitian dapat disimpulkan bahwa grafik hasil simulasi menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda dengan grafik pada referensi, ini menunjukkan bahwa persamaan dan simulasi yang dilakukan sudah mampu merefleksikan keadaan fisiologis peredaran darah manusia. Sedikit perbedan hasil grafik simulasi diakibatkan karena perbedaan parameter serta asumsi yang digunakan.

Kata kunci: Sistem Mekanis Kardiovaskuler, Simulasi, Tekanan, Aliran

ABSTRACT

Non-invasive measurement method has made rapid developments in the field of biomedical engineering. One of research is impedance cardiography (ICG), which provide information of pulsation basic. By knowing this kind of measurement technique, it will assist inspection of the patient's physiological condition with cardiovascular system.

This research is aimed to determine the mechanical characteristics of the cardiovascular system in the human body such as a wave graph of pressure, flow, and volume, based on pressure–flow model in rest condition, and analyze the simulation results by implementing state of the physiology cardiovascular disease. To obtain the wave chart that is modeled by the cardiovascular system using a lumped parameter method, formulate the differential equations of the pressure–flow dynamics equation for an incompressible fluid in a segment of a cylindrical elastic tube and simulate the model using the Simulink toolboxes from Matlab R2008b.

The simulation with lumped parameter method resulted wave graphics of pressure, flow, and volume of physiological state a person in rest condition, the left ventricular pressure is 120 mmHg, right ventricular pressure is 30 mmHg, left ventricular outflow is 800 mL/sec and volume in the left ventricle is 160 mL. By implementing the simulation have been developed on the physiological state of cardiovascular disease, hypertension occurs when the arteries resistance $R_{3i} = 0.61 \text{ mmHg} \cdot \text{s/mL}$ with the pressure of the left ventricle is 145 mmHg. For coronary heart condition, ventricular pressure decreased until 82 mmHg in the value of the coronary arteries resistance is $R_{3o} = 0.852 \text{ mmHg} \cdot \text{s/mL}$. This research assumed heart has the character of passive because there is no feedback signal that can compensate if the pressure in the systemic circulation is reduced.

The research can be concluded that the graph from simulation shows the results are not much different from the reference chart, this results indicates that the equation and the simulation was able to reflect on the human circulatory physiological circumstances. A little different of a graphic simulation result due to differences in the parameters and assumptions used.

Keywords: *Cardiovascular Mechanical Systems, Simulation, Pressure, Flow*

MOTTO:

"Sesungguhnya Sesudah Kesulitan Itu Ada Kemudahan"
(Q.S Alam Nasyrah : 6)

***"Kesabaran dan ketekunan menghadapi sesuatu akan
menghasilkan karya yang besar"***

PERSEMBAHAN:

Kupersembahkan Karyaku ini Kepada:

Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya

Kedua orang tuaku, ***Bapak Edy Urito*** dan ***Ibu Haryatun, AMa. Pd*** atas segala kasih sayang yang tulus, serta pengorbanannya selama ini

Kakakku ***Anggie Suci Ramdhani, A.MK*** dan Adikku ***Rayi Rosadi Jati Satria*** atas semangat dan dukungannya

A_O A.Md atas perhatian, dukungan dan kasih sayangnya

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya kepada penulis, sehingga penulis dapat melewati masa studi dan menyelesaikan Tugas Sarjana yang merupakan tahap akhir dari proses untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Mesin di Universitas Diponegoro.

Keberhasilan penulis dalam menyelesaikan Tugas Sarjana ini tidak lepas dari bantuan orang-orang yang dengan segenap hati memberikan bantuan, bimbingan dan dukungan baik moral maupun material. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ing. Ir. Ismoyo Haryanto, MT selaku dosen pembimbing Tugas Sarjana, yang telah memberikan bimbingan, pengarahan-pengarahan dan masukan kepada penulis hingga terselesainya Tugas Sarjana ini.
2. Dr. Ir. Dipl. Ing. Berkah Fajar TK selaku ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Diponegoro beserta staf pengajar yang telah membagikan ilmu yang berguna baik dimasa sekarang maupun dimasa yang mendatang.
3. Bapak dan ibu di rumah, terimakasih atas pengorbanannya baik material maupun moril hingga saya bisa mencapai tingkat pendidikan sarjana.
4. Ardi “Nyong” selaku partner Tugas Sarjana ini, Para asisten laboratorium Proses Produksi (Arman, Komting Ghazi, Surya, Arif, Wiko, Rifki) serta seluruh rekan-rekan seperjuangan Teknik Mesin angkatan 2006 terimakasih atas bantuannya.

Penulis menyadari kekurangan yang ada pada laporan Tugas Sarjana ini mengingat keterbatasan kemampuan dan pengetahuan yang penulis miliki, sehingga saran dan kritik dari pembaca yang bersifat membangun selalu penulis harapkan.

Akhir kata semoga laporan Tugas Sarjana ini bermanfaat bagi penulis sendiri maupun bagi para pembaca.

Semarang, Desember 2010

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
TUGAS SARJANA	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
MOTTO DAN PERSEMBAHAN.....	viii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Alasan Pemilihan Judul.....	2
1.3 Tujuan Penulisan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Metode Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB II DASAR TEORI	7
2.1 Sistem Kardiovaskuler	7
2.1.1 Siklus Jantung	9
2.1.2 Tinjauan Sirkulasi	11

2.1.3	Teori Dasar Fungsi Sirkulasi	12
2.2	Komputasi Model Hemodinamik	13
2.2.1	Volume Darah	14
2.2.2	Aliran Darah	14
2.2.3	Tekanan Darah	15
2.2.4	Tahanan Terhadap Aliran Darah	16
2.2.5	Komplians (<i>compliance</i>) Vaskuler (atau Kapasitans) ...	16
2.2.6	Hubungan Antara Tekanan, Aliran dan Tahanan	17
2.3	Impedansi Kardiografi (ICG)	18
2.3.1	Pengukuran Impedansi Kardiografi (ICG)	20
2.3.2	Prinsip Kerja Impedansi Kardiografi (ICG)	21
2.4	Persamaan Dinamika Tekanan–Aliran Fluida Mampat	24
2.5	Parameter Model Tergumpal (<i>lumped</i>)	25
2.6	Hipertensi atau Tekanan Darah Tinggi	26
2.7	Jantung Koroner atau Infark Miokard Akut (IMA)	27
BAB III	METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1	Asumsi dan Parameter Model	29
3.1.1	Asumsi Sistem	29
3.1.2	Parameter Model	30
3.2	Model Mekanis dan Elektris Sistem Kardiovaskuler	31
3.2.1	Elemen Model Sederhana	31
3.2.2	Representasi Model Sirkuit	32

3.2.3	Model Tergumpal (<i>lumped</i>)	33
3.3	Formulasi Matematis	35
3.3.1	Penyusunan Persamaan Differensial	35
3.3.2	Komponen Aliran dan Tekanan	38
3.3.3	Fungsi Input	39
3.3.4	Representasi Model Simulink	42
3.3.5	Implementasi Kondisi Fisiologis pada Model	48
BAB IV	ANALISA DAN PEMBAHASAN	50
4.1	Keluaran dari Model Sistem Sirkulasi	50
4.1.1	Tekanan pada Ventrikel Kiri (Tekanan Sistol)	50
4.1.2	Tekanan pada Ventrikel Kanan	52
4.1.3	Aliran Keluar (<i>Outflow</i>) pada Ventrikel Kiri	54
4.1.4	Volume pada Ventrikel Kiri	56
4.2	Variasi Nilai Tahanan dan Implementasi Kondisi Fisiologis ...	58
4.2.1	Tekanan Darah Tinggi (Hipertensi)	58
4.2.2	Jantung Koroner (Infark Miokard Akut / IMA)	66
4.3	Analisa Hasil Keluaran	74
4.3.1	Hubungan Tahanan Pembuluh Arteri (R_{3i}) dengan Penyakit Hipertensi	75
4.3.2	Hubungan Tahanan Pembuluh Arteri Koroner (R_{3o}) dengan Penyakit Jantung Koroner	76

BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	78
5.1	Kesimpulan	78
5.2	Saran	79
DAFTAR PUSTAKA		80
LAMPIRAN.....		82

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Parameter Masukan	30
Tabel 3.2	Variabel Keluaran	30
Tabel 3.3	Persamaan Differensial dari Model.....	36
Tabel 3.4	Parameter yang Digunakan dalam Permodelan	39
Tabel 3.5	Fungsi Input Jantung Kanan.....	39
Tabel 3.6	Fungsi Input Jantung Kiri	40
Tabel 3.7	Variasi nilai tahanan pembuluh arteri R_{3i} dan pembuluh arteri koroner R_{30}	49
Tabel 4.1	Variasi nilai tahanan pembuluh arteri R_{3i}	59
Tabel 4.2	Variasi nilai tahanan dan Nilai Tekanan Ventrikel Kiri	60
Tabel 4.3	Variasi nilai tahanan dan Nilai Tekanan Ventrikel Kanan	62
Tabel 4.4	Variasi nilai tahanan dan Nilai <i>Outflow</i> Ventrikel Kiri	64
Tabel 4.5	Variasi nilai tahanan dan Nilai Volume Ventrikel Kiri	66
Tabel 4.6	Variasi nilai tahanan pembuluh arteri R_{30}	67
Tabel 4.7	Variasi nilai tahanan dan Nilai Tekanan Ventrikel Kiri	68
Tabel 4.8	Variasi nilai tahanan dan Nilai Tekanan Ventrikel Kanan	70
Tabel 4.9	Variasi nilai tahanan dan Nilai <i>Outflow</i> Ventrikel Kiri	72
Tabel 4.10	Variasi nilai tahanan dan Nilai Volume Ventrikel Kiri	74
Tabel 4.11	Data Nilai Variasi Tahanan Pembuluh Arteri dan Tekanan Ventrikel Kiri	75
Tabel 4.12	Data Nilai Variasi Tahanan Pembuluh Arteri Koroner dan Tekanan Ventrikel Kiri	76

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Diagram Alir Penelitian	4
Gambar 2.1 Sistem Sirkulasi Darah	8
Gambar 2.2 Struktur jantung dan arah aliran darah yang melewati ruang jantung	10
Gambar 2.3 Sirkulasi Peredaran Darah	12
Gambar 2.4 Hubungan antara tekanan, tahanan, dan aliran darah	17
Gambar 2.5 Kurva Impedansi Dada yang diperoleh dari Model. Defleksi naik di dalam kurva menandakan suatu penurunan impedansi ($-\Delta Z'$)	18
Gambar 2.6 Gelombang Kardiogram Impedansi (dZ/dt)	19
Gambar 2.7 Pengukuran Impedansi Kardiogram	20
Gambar 2.8 Struktur Silindris dari Bahan Penghantar yang Homogen dengan Panjang L yang Seragam	22
Gambar 2.9 Elemen Hemodinamik Pembuluh Darah	26
Gambar 2.10 Representasi Rangkaian Ekuivalent Listrik	26
Gambar 2.11 (a) Potongan Melintang Pembuluh Arteri Normal/Sehat.....	28
(b) Potongan Melintang Pembuluh Arteri Penyempitan karena Timbunan Kolesterol.....	28
Gambar 3.1 Model Pararel yang Disederhanakan dari Sistem Peredaran Darah Manusia	32
Gambar 3.2 Representasi Elemen Hemodinamik Pembuluh Darah	32
Gambar 3.3 Representasi sirkuit Pembuluh Darah	33
Gambar 3.4 Model Tergumpal Sistem Sirkulasi yang Disederhanakan	34
Gambar 3.5 Representasi Blok Simulink dari Fungsi Input Jantung Kanan	40

Gambar 3.6 Fungsi Input dari Jantung Kanan	40
Gambar 3.7 Representasi Blok Simulink dari Fungsi Input Jantung Kiri	41
Gambar 3.8 Fungsi Input dari Jantung Kiri	41
Gambar 3.9 Representasi Blok Simulink dari Model	43
Gambar 3.10 Representasi Blok Simulink dari Jantung Kanan	44
Gambar 3.11 Representasi Blok Simulink dari Paru-paru	44
Gambar 3.12 Representasi Blok Simulink dari Jantung Kiri	45
Gambar 3.13 Representasi Blok Simulink dari Aorta	45
Gambar 3.14 Representasi Blok Simulink dari Vena Cava	46
Gambar 3.15 Representasi Blok Simulink dari Lengan	46
Gambar 3.16 Representasi Blok Simulink dari Kepala	47
Gambar 3.17 Representasi Blok Simulink dari Batang Percabangan	47
Gambar 3.18 Representasi Blok Simulink dari Kaki	48
Gambar 4.1 Grafik Tekanan pada Ventrikel Kiri Hasil Simulasi pada Kondisi Normal Istirahat	50
Gambar 4.2 Validasi Grafik Tekanan Ventrikel Kiri Hasil Simulasi dengan Grafik Referensi	51
Gambar 4.3 Grafik Tekanan pada Ventrikel Kanan Hasil Simulasi pada Kondisi Normal Istirahat	52
Gambar 4.4 Validasi Grafik Tekanan Ventrikel Kanan Hasil Simulasi dengan Grafik Referensi	53
Gambar 4.5 Grafik Aliran yang Keluar (<i>outflow</i>) pada Ventrikel Kiri Hasil Simulasi pada Kondisi Normal Istirahat	54
Gambar 4.6 Validasi Grafik Aliran Keluar (<i>otflow</i>) Ventrikel Kiri Hasil Simulasi dengan Grafik Referensi	55

Gambar 4.7	Grafik Volume pada Ventrikel Kiri Hasil Simulasi pada Kondisi Normal Istirahat	56
Gambar 4.8	Validasi Grafik Volume Ventrikel Kiri Hasil Simulasi dengan Grafik Referensi	57
Gambar 4.9	Grafik Tekanan Ventrikel Kiri Kondisi Normal dan Beberapa Variasi R_{3i}	59
Gambar 4.10	Grafik Tekanan Ventrikel Kanan Kondisi Normal dan Beberapa Variasi R_{3i}	61
Gambar 4.11	Grafik <i>Outflow</i> Ventrikel Kiri Kondisi Normal dan Beberapa Variasi R_{3i}	63
Gambar 4.12	Grafik Volume Ventrikel Kiri Kondisi Normal dan Beberapa Variasi R_{3i}	65
Gambar 4.13	Grafik Tekanan Ventrikel Kiri Kondisi Normal dan Beberapa Variasi R_{3o}	67
Gambar 4.14	Grafik Tekanan Ventrikel Kanan Kondisi Normal dan Beberapa Variasi R_{3o}	69
Gambar 4.15	Grafik <i>Outflow</i> Ventrikel Kiri Kondisi Normal dan Beberapa Variasi R_{3o}	71
Gambar 4.16	Grafik Volume Ventrikel Kiri Kondisi Normal dan Beberapa Variasi R_{3io}	73
Gambar 4.17	Grafik Hubungan Tahanan Pembuluh Arteri (R_{3i}) dengan Tekanan Ventrikel Kiri	75
Gambar 4.18	Grafik Hubungan Tahanan Pembuluh Arteri Koroner (R_{3o}) dengan Tekanan Ventrikel Kiri	77