



UNIVERSITAS DIPONEGORO

**PEMODELAN STRUKTUR CERDAS MENGGUNAKAN
PIEZOELEKTRIK DENGAN METODE ELEMEN HINGGA DAN
PENGONTROLAN DENGAN LQR**

TUGAS AKHIR

**DEDE SULAIMAN
L2E 006 028**

**FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN**

**SEMARANG
SEPTEMBER 2011**

TUGAS AKHIR

Diberikan Kepada : Nama : Dede Sulaiman
NIM : L2E 006 028

Dosen Pembimbing I : Dr.-Ing. Ir. Ismoyo Haryanto, MT

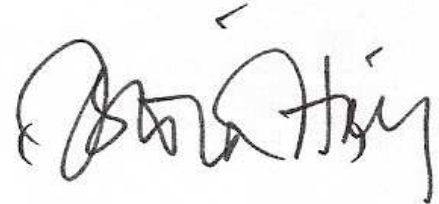
Jangka Waktu :

Judul : Pemodelan Struktur Cerdas menggunakan Piezoelektrik dengan Metode Elemen Hingga dan Pengontrolan dengan LQR

Isi Tugas : 1. Memodelkan Struktur Cerdas dengan Metode Elemen Hingga.
2. Merancang sistem kontrol dengan metode kontrol LQR *state dan output feedback*.

Semarang, September 2011

Pembimbing I



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 : Dede Sulaiman

NIM : L2E 006 028

Tanda Tangan :



Tanggal : September 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :



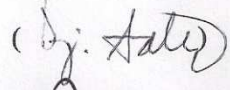

NAMA : Dede Sulaiman

NIM : L2E 006 028

Jurusan/Program Studi : Teknik Mesin

Judul Tugas Akhir : Pemodelan Struktur Cerdas menggunakan Piezoelektrik dengan Metode Elemen Hingga dan Pengontrolan dengan LQR

Telah berhasil dipertahankan dihadapan 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 I	: Dr.-Ing. Ir. Ismoyo Haryanto, MT 
Penguji	: Dr. Susilo Adi Widyanto, ST, MT 
Penguji	: Ir. Djoeli Satrijo, MT 
Penguji	: Dr. MSK. Tony Suryo Utomo, ST, MT 

Semarang, September 2011

Ketua Jurusan Teknik Mesin,


Dr. Dipl.-Ing. Ir. Berkah Fajar T.K.

NIP. 195907221987031003

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Dede Sulaiman
NIM : L2E 006 028
Jurusan/Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Universitas Diponegoro
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 :

**PEMODELAN STRUKTUR CERDAS MENGGUNAKAN PIEZOELEKTRIK
DENGAN METODE ELEMEN HINGGA DAN PENGONTROLAN DENGAN LQR**

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 : September 2011

Yang menyatakan



(Dede Sulaiman)
NIM. L2E 006 028

HALAMAN PERSEMBAHAN

- ❖ *Ayahanda **Asrif** yang berjuang dan tanpa lelah selalu memberikan kehidupan yang terbaik dan menjadi panutan bagi saya.*
- ❖ *Ibunda tercinta **Yelrefli** yang membesarkan saya dengan kasih sayang dan do'anya yang menjadi pelang jalan kehidupan.*
- ❖ ***Beny Fandorita** kakak yang selalu mendukung dan memberikan motivasi terhadap perjalanan saya.*
- ❖ ***Asri Nurdin** dan **Alan Yusuf** adik-adik yang kusayangi dan kbanggakan.*
- ❖ *Malaihatku terkasihi **Winda Aprilsa**, atas cinta, perhatian, pengorbanan dan semangat yang telah diberikan. Semoga dapat terus memberikan kasihnya.*
- ❖ *Terutama untuk keluarga besar yang tidak disebutkan satu persatu, terima kasih atas segala yang diberikan.*
- ❖ *Semua rekan-rekan di Jurusan Teknik Mesin Undip serta keluarga **IKAMMI** Semarang, yang telah menemani dan membantu saya dalam suka maupun duka. Semoga talisilaturahmi ini akan selalu terhubung dimanapun kita berada.*

Motto

“Sesuatu yang tak mudah adalah hal yang akan sangat berharga”

ABSTRAK

Akibat kondisi lingkungan dan operasional yang berubah-ubah, struktur mempunyai perilaku statik dan dinamik yang berubah-ubah pula dan tidak terkendali. Perubahan perilaku ini berupa getaran dan ketidakstabilan perubahan bentuk geometri sehingga dapat menurunkan fungsi dari struktur ataupun menyebabkan kegagalan seperti retak struktur. Oleh sebab itu perlu dilakukan pengendalian struktur. Salah satu cara dalam mengendalikan struktur dengan menerapkan struktur cerdas yaitu struktur yang dapat beradaptasi terhadap perubahan kondisi lingkungan dan operasional karena adanya sensor dan aktuator yang dikendalikan oleh sistem kontrol. Pada prakteknya kebanyakan model struktur-struktur seperti blade helikopter, antena satelit, dan struktur wahana antariksa mendekati bentuk batang kantilever dan membutuhkan sensor dan aktuator yang tidak menambah bobot struktur. Sehingga dalam tugas akhir ini akan dimodelkan batang kantilever dengan pemasangan material cerdas berupa material piezoelektrik sebagai sensor dan aktuator untuk peredam getaran. Tujuan tugas akhir ini adalah membuat struktur cerdas yang menggunakan material cerdas berupa batang kantilever yang dipasang piezoelektrik sensor dan aktuator. Menggunakan metode elemen hingga untuk mendapatkan persamaan dinamik dari struktur. Persamaan konstitutive piezoelektrik digunakan dalam membentuk persamaan sensor dan aktuator. Kemudian LQR *state* dan *output feedback* digunakan sebagai kontrol aktif getaran struktur. Sehingga didapat kestabilan dengan semua nilai eigen bernilai negatif dan nilai redaman $2.00e-003$ dari *open loop* menjadi $4.00e-002$ pada *state feedback* dan $4.00e-002$ juga pada *output feedback*.

Kata kunci: Struktur cerdas, piezoelektrik, LQR *state* dan *output feedback*

ABSTRACT

Due to environmental and operational conditions, the dynamic and static behavior of the structure will fluctuate and uncontrollable. These behavior manifest in a form of vibration and geometry changes so it cause reducing the function of the structure or failure such as cracking of the structure. Therefore, controlling the structure during its operation is necessary. For this purpose, a smart structure can be applied. That is a structure that can adapt to environmental changing and operational conditions due to the sensors and actuators that are controlled by the control system. In practice, most structures like a helicopter blade, satellite antenna, and the structure of the spacecraft approached as cantilever beam and need embedding sensors and actuators without adding the structural weight.

In this final project a cantilever beam with the mounted smart materials in the form of piezoelectric materials as sensors and actuators for vibration damper will be modelled and analyzed. The purpose of this final project is to develop a modelling of smart structures using smart materials in the form of cantilever beam mounted piezoelectric sensor and actuator. In order to obtain equation of motion of structure, a finite element method is widely applied. For this purpose, the piezoelectric constitutive equation are used in establish equations sensor and actuator. Moreover, LQR state and output feedback is applied as an active vibration control of structure. The results showed that stability conditions which are indicated by negative eigenvalues can be reached with damping ratio of $2.00e-003$ for open loop system, $4.00e-002$ for state feedback and also $4.00e-002$ for output feedback system.

Key words: Smart structures, piezoelectric, LQR state and output feedback

KATA PENGANTAR

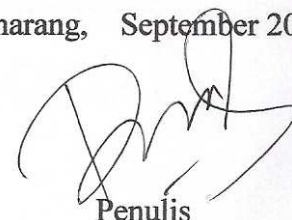
Segala puji syukur senantiasa penulis panjatkan kepada Allah S.W.T. karena berkat rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan judul ***“Pemodelan Struktur Cerdas menggunakan Piezoelektrik dengan Metode Elemen Hingga dan Pengontrolan dengan LQR”***. Tugas akhir ini merupakan salah satu syarat yang harus dipenuhi pada program strata satu (S-1) di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro Semarang.

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

1. Dr. -Ing. Ir. Ismoyo Haryanto, MT selaku Dosen Pembimbing, yang telah memberikan bimbingan, pengarahan dan masukan kepada penulis hingga terselesainya Tugas Akhir ini.
2. Saudara Willy Bahari rekan seperjuangan di lab SAC serta rekan-rekan angkatan 2006 yang telah berbagi ilmu dan pengetahuan kepada penulis.
3. Semua pihak-pihak yang telah membantu.

Penulis menyadari akan kekurangan dan keterbatasan pengetahuan yang dimiliki, untuk itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun dari semua pihak. Akhir kata semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan semakin menambah kecintaan serta rasa penghargaan kita terhadap Jurusan Teknik Mesin Universitas Diponegoro ini. Terima kasih

Semarang, September 2011



Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN TUGAS SARJANA.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSUTUJUAN PUBLIKASI	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
MOTTO	vii
ABSTRAK.....	viii
<i>ABSTRACT</i>	ix
KATA PENGANTAR	x
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xv
NOMENKLATUR.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang Masalah.....	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penulisan.....	3
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5. Metode Penyelesaian Masalah	3
1.6. Sistematika Penulisan	4
BAB II DASAR TEORI	5
2.1. Struktur dan Material Cerdas.....	5
2.2. Piezoelektrik Keramik	9
2.2.1. Persamaan Konstitutive Piezoelektrik	11
2.2.2. Sensor dan Aktuator Piezoelektrik Keramik.....	14
2.3. Teori <i>Euler-Bernoulli Beam</i>	16

2.4. Sistem Getaran Multi Derajat Kebebasan	17
2.4.1. Metode Elemen Hingga	18
2.4.2. Modal Analisis	18
2.5. Kontrol Getaran Aktif.....	21
2.5.1. Sistem Kontrol untuk Sistem Ruang Keadaan (<i>state space</i>).....	21
2.5.2. <i>Linear Quadratic Regulator</i> (LQR).....	23
BAB III PEMODELAN STRUKTUR CERDAS DAN DISAIN KONTROL	
GETARAN	25
3.1. Model Struktur Cerdas.....	25
3.1.1. Pemodelan Elemen Hingga.....	26
3.1.2. Persamaan Sensor	29
3.1.3. Persamaan Aktuator	30
3.1.4. Persamaan Dinamik Struktur Cerdas	31
3.1.5. Model Ruang Keadaan Struktur Cerdas.....	35
3.2. Disain Kontrol.....	37
3.2.1. <i>LQR State Feedback</i>	37
3.2.2. <i>LQR Output Feedback</i>	38
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1. Hasil Pemodelan Struktur Cerdas	41
4.1.1. Karakteristik Getaran Bebas	41
4.1.2. Matrik Ruang Keadaan	42
4.1.3. Kestabilan <i>LQR State Feedback</i>	45
4.1.4. Kestabilan <i>LQR output feedback</i> dengan dinamik observer.....	47
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1. Kesimpulan	50
5.2. Saran	50
DAFTAR PUSTAKA	

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Karakteristik utama dari material-material cerdas	8
Tabel 2.2	Sifat-sifat dasar dari piezokeramik dengan sensitifitas tinggi.....	13
Tabel 4.1	Properti dari batang kantilever dan piezoelektrik	41
Tabel 4.2	Perbandingan frekuensi pribadi batang kantilever	42
Tabel 4.3	Karakteristik sistem <i>open loop</i> menggunakan 2 modus.....	43
Tabel 4.4	Karakteristik sistem <i>open loop</i> menggunakan 4 modus.....	44
Tabel 4.5	Karakteristik sistem LQR <i>state feedback control</i> menggunakan 2 modus	46
Tabel 4.6	Karakteristik sistem LQR <i>state feedback control</i> menggunakan 4 modus	47
Tabel 4.7	Karakteristik sistem LQR <i>ouput feedback control</i> menggunakan 2 modus.....	48
Tabel 4.8	Karakteristik sistem LQR <i>ouput feedback control</i> menggunakan 4 modus.....	49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Lima komponen dasar dari struktur cerdas	6
Gambar 2.2	Sistem struktur cerdas konvensional yang menggunakan hidrolik aktuator	6
Gambar 2.3	Kaitan rangsangan dan respon pada material-material cerdas	9
Gambar 2.4	Skema struktur cerdas dengan material cerdas	9
Gambar 2.5	Reaksi dari polarisasi elemen piezoelektrik jika diberi rangsangan.....	10
Gambar 2.6	Sistem koordinat dari piezoelektrik dengan polarisasi pada arah 3	12
Gambar 2.7	Piezokeramik plat dengan konfigurasi elektroda yang berbeda	15
Gambar 2.8	Piezokeramik plat dengan interdigitated elektroda.....	15
Gambar 2.9	Pemasangan piezokeramik plat pada lapisan.....	16
Gambar 2.10	Model <i>Euler Bernoulli beam</i>	17
Gambar 2.11	Konsep <i>feedback control law</i> untuk persamaan ruang keadaan	22
Gambar 3.1	Batang kantilever dengan piezoelektrik.....	25
Gambar 3.2	Elemen batang regular (a), elemen batang piezoelektrik (b)	26
Gambar 3.3	<i>LQR output feedback control</i> dengan observer	39
Gambar 4.1	Modus bending dari struktur cerdas.....	42
Gambar 4.2	Respon dinamik sistem <i>open loop</i> menggunakan 2 modus	43
Gambar 4.3	Respon dinamik sistem <i>open loop</i> menggunakan 4 modus	45
Gambar 4.4	Respon dinamik sistem <i>LQR state feedback control</i> menggunakan 2 modus	46
Gambar 4.5	Respon dinamik sistem <i>LQR state feedback control</i> menggunakan 4 modus	47
Gambar 4.6	Respon dinamik sistem <i>LQR output feedback control</i> menggunakan 2 modus	48
Gambar 4.7	Respon dinamik sistem <i>LQR output feedback control</i> menggunakan 4 modus	49

NOMENKLATUR

[A]	Matrik sistem	-
A_b	Luas penampang melintang batang	m^2
A_p	Luas penampang melintang piezoelektrik	m^2
A_{pb}	Luas penampang elemen batang piezoelektrik	m^2
[B]	Matrik masukan	-
b	Lebar batang	m
b_p	Lebar piezoelektrik	m
[C]	Matrik pengukuran	-
[C']	Matrik peredaman	-
{D}	Vektor perpindahan listrik	C/m^2
[d]	Matrix gabungan persamaan mekanis dan elektrik	m/V
d_{31}	Konstanta regangan PZT	m/V
{E}	Vektor medan listrik	V/m
E_b	Modulus elastisitas batang kantilever	GPa
E_3	Medan listrik piezoelektrik arah 3	V/m
E_p	Modulus elastisitas piezoelektrik	GPa
E'	Modulus elastisitas elemen batang piezoelektrik	GPa
{F}	Vektor gaya	-
$f_{control}$	Gaya kontrol	N
[G]	Matrik gain umpan balik	-
G_c	Gain pengaturan sinyal	-
$H_i(x)$	<i>Hermitian shape function</i>	-
I	Momen inersia elemen batang piezoelektrik	m^4
I_b	Momen inersia elemen batang regular	m^4
I_p	Momen inersia piezoelektrik	m^4
[K]	Matrik kekakuan	-
k_{ij}	Koefesien <i>electromechanical coupling</i>	-
K^b	Matrik kekakuan elemen batang regular	-

K^p	Matrik kekakuan elemen batang piezoelektrik	-
L_b	Panjang batang kantilever	m
l_b	Panjang elemen batang regular	m
l_p	Panjang piezoelektrik	m
$[M]$	Matrik massa	-
M^b	Matrik massa elemen batang regular	-
M^p	Matrik massa elemen batang piezoelektrik	-
M_A	Momen dari aktuator	Nm
$[Q]$	Matrik pembobotan	-
Q_j	Gaya atau momen yang bekerja pada koordinat q_j	-
$\{q\}$	Vektor generalized koordinat	-
q_j	Generalized koordinat $j = 1, 2, \dots, n$	-
$\{\ddot{q}\}$	Vektor percepatan generalized koordinat	-
$[R]$	Matrik pembobotan	-
$[S]$	Matrik <i>ricatti</i>	-
$\{S\}$	Vektor regangan mekanis	-
s^E	Matrix <i>mechanical compliance</i>	-
$\{T\}$	Vektor tegangan mekanis	N/m^2
t_a	Tebal piezoelektrik aktuator	m
t_b	Tebal batang kantilever	m
t_s	Tebal piezoelektrik sensor	m
$\{u\}$	Vektor masukan	-
v	Perpindahan	m
V^a	Tegangan input aktuator	V
V^s	Tegangan listrik sensor	V
$\{x\}$	Vektor keadaan	-
$\{y\}$	Vektor keluaran	-
α, β	Konstanta peredaman proportional	-
ε_x	Regangan batang kantilever	-

ε^T	Permitifitas	-
ω	Frekuensi pribadi	rad/s
$\{\phi\}$	Modus bentuk	-
$[\Phi]$	Matrik modal	-
$[\eta]$	Vektor modal koordinat	-
$\{\ddot{\eta}\}$	Vektor percepatan modal koordinat	-
$[\Phi]^T$	Transpose matrik modal	-
ρ_b	Massa jenis batang kantilever	kg/m^3
ρ_p	Massa jenis piezoelektrik	kg/m^3
ρ	Massa jenis elemen batang piezoelektrik	kg/m^3