



UNIVERSITAS DIPONEGORO

**ANALISA STABILITAS AEROELASTIK *FLUTTER*
PADA *ROTOR BLADE* HELIKOPTER
DALAM DOMAIN FREKUENSI**

TUGAS AKHIR

**WILLY BAHARI
L2E 006 088**

**FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN**

**SEMARANG
2011**

TUGAS AKHIR

Diberikan Kepada : Nama : Willy Bahari
NIM : L2E 006 088

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

Dosen Pembimbing II : Dr. Achmad Widodo, ST, MT

Jangka Waktu : 9 (sembilan) bulan

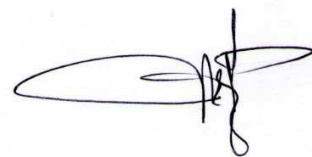
Judul : Analisa Stabilitas Aeroelastik *Flutter* pada *Rotor Blade* Helikopter dalam Domain Frekuensi

Isi Tugas : 1. Menentukan kecepatan *flutter* pada *rotor blade* helikopter yang dikaji.
2. Mengetahui pengaruh kecepatan *flutter* terhadap posisi pusat massa, kecepatan putar *rotor blade* dan perbandingan kekakuan struktur torsi dan kekakuan struktur bending.

Semarang, Juli 2011

Pembimbing I

Pembimbing II



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

Dr. Achmad Widodo, ST, MT
NIP. 197307021999031001

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 : Willy Bahari

NIM : L2E 006 088

Tanda Tangan :

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Willy Bahari', written on a light blue background.

Tanggal : Juli 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

NAMA : Willy Bahari

NIM : L2E 006 088

Jurusan/Program Studi : Teknik Mesin

Judul Tugas Akhir : Analisa Stabilitas Aeroelastik *Flutter* pada *Rotor Blade*
Helikopter dalam Domain Frekuensi

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.

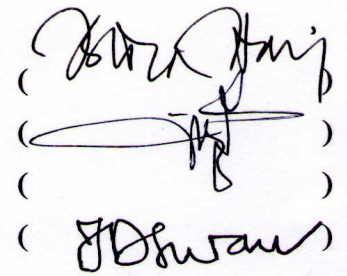
TIM PENGUJI

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

Pembimbing II : Dr. Achmad Widodo, ST, MT

Penguji : Ir. Dwi Basuki Wibowo, MS

Penguji : Dr. Joga Dharma Setiawan, MSc



Semarang, Juli 2011

Jurusan Teknik Mesin
Ketua,

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

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Willy Bahari
NIM : L2E 006 088
Jurusan/Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Universitas Diponegoro
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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


ANALISA STABILITAS AEROELASTIK *FLUTTER* PADA *ROTOR BLADE*
HELIKOPTER DALAM DOMAIN FREKUENSI

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 : Juli 2011

Yang menyatakan



(Willy Bahari)
NIM. L2E 006 088

HALAMAN PERSEMBAHAN

- ❖ Tugas Akhir ini Saya dedikasikan untuk ayahku, **Waluyo Saptamtomo** (Alm) yang telah melakukan tugasnya sebagai ayah yang terbaik dan menjadi panutan saya. Semoga Allah SWT memberikan tempat yang terbaik di sisi-Nya. Amin...
- ❖ Ibuku tercinta **Tri Harnani**, kedua kakakku tersayang **One Wiharyanti S.S** dan **Dwi Jayanti S.Pd**, dan seluruh saudaraku dari eyang putri, pakde bude, om tante, mas mba dan adek sepupu yang tak mungkin saya sebutkan satu persatu, atas segala cinta kasih dan pengorbanan yang tidak terkira jasanya, yang telah memberikan dukungan, semangat, do'a yang tulus ikhlas, serta kepercayaan kepada penulis untuk mengemban amanah yang mulia ini.
- ❖ Tambatan hatiku terkasih **Marlina**, atas cinta, perhatian, dukungan dan semangat yang telah diberikan. Semoga dapat terus memberikan kasihnya. Amin...
- ❖ Semua rekan-rekan di Jurusan Teknik Mesin Undip, kos Iwenisari 14, Imake Rayon Semarang, Diponegoro Care Center (DCC), tim KKN Undip desa Sampang 2010 yang telah menemani dan peduli kepada saya, serta banyak membantu saya di sini. Jaga terus kekompakan dan semangat juang kalian, saya akan berada dalam barisan untuk melangkah bersama kalian meraih cita-cita. *Bismillahirrohmanirrohim.....*

MOTTO

“Jangan lihat masa lampau dengan penyesalan, jangan pula lihat masa depan dengan ketakutan, tapi lihatlah sekitar anda dengan penuh kesadaran”

-James Thurber-

“Kebanyakan dari kita tidak mensyukuri apa yang sudah kita miliki, tetapi kita selalu menyesali apa yang belum kita capai”

-James Thurber-

“Belajarlah dari kesalahan orang lain. Anda tak dapat hidup cukup lama untuk melakukan semua kesalahan itu sendiri”

- Martin Vanbee-

ABSTRAK

Helikopter merupakan alat transportasi yang menggunakan *rotor blade* untuk menaikkan, menurunkan serta menentukan arahnya dari gaya angkat yang dihasilkan. Oleh sebab itu, kestabilan *rotor blade* helikopter sangat diperlukan agar mendapatkan gaya angkat yang sesuai. Penelitian dibutuhkan sebelum perancangan *rotor blade* untuk mengetahui kestabilannya. Salah satu dasar ilmu mengenai hal tersebut adalah aeroelastisitas, yang mempelajari fenomena-fenomena interaksi struktur elastis dengan gaya aerodinamik dalam aliran udara. Masalah stabilitas termasuk aspek aeroelastik dinamik. *Flutter* adalah salah satu bagian aeroelastik dinamik, merupakan ketidakstabilan aeroelastik dinamik ditandai dengan struktur mengalami osilasi berkelanjutan karena interaksi antara gaya elastik, gaya inersia dan gaya aerodinamik yang bekerja pada *rotor blade*. Tujuan tugas akhir ini adalah menentukan kecepatan *flutter* pada sebuah *rotor blade* helikopter. Menggunakan metode Holzer dan Myklestad-Prohl untuk menentukan frekuensi natural dan *mode shape* dari modus gerak *rotor blade*. Persamaan Lagrange digunakan untuk membentuk persamaan gerak *flutter*. Gaya dan momen aerodinamik *unsteady* menggunakan fungsi Theodorsen. Dan metode K digunakan untuk memecahkan solusi persamaan gerak *flutter*. Selanjutnya didapat mempelajari pengaruh kecepatan *flutter* terhadap posisi pusat massa, kecepatan putar dan kekakuan struktur.

Kata kunci: Helikopter, *rotor blade*, aeroelastisitas, aeroelastik dinamik, *flutter*, kecepatan *flutter*.

ABSTRACT

A helicopter uses rotor blade to obtain lift force for flying, landing and taking-off. Therefore, helicopter rotor blade stability is necessary to generated corresponding lift force. The research is needed to determine rotor blade stability before it's designed. The basic science is aeroelasticity, which is a study about interactions of elastic structural with aerodynamic forces in airflow. Stability problem include dynamic aeroelastic aspect. Flutter is one of them, which is a dynamic aeroelastic instability characterized by sustained oscillation of structure arising from interaction between the elastic, inertial and aerodynamic forces acting on the rotor blade. The purpose of this final project is flutter analysis to get flutter speed from a helicopter rotor blade. Holzer and Myklestad-Prohl Method is applied to determine natural frequencies and mode shapes of rotor blade motion. Lagrange equation is used to establish flutter equation of motion. Force and moment unsteady aerodynamic are applied to Theodorsen function. K method is used to solve flutter equation of motion. Then, study about influence flutter speed with center of gravity position, rotational speed and structure stiffness.

Keywords: Helicopter, rotor blade, aeroelasticity, dynamic aeroelastic, flutter, flutter speed.

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 “**Analisa Stabilitas Aeroelastik Flutter pada Rotor Blade Helikopter dalam Domain Frekuensi**”. 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. Ismoyo Haryanto, MT dan Dr. Achmad Widodo, ST, MT selaku Dosen Pembimbing, yang telah memberikan bimbingan, pengarahan dan masukan kepada penulis hingga terselesainya Tugas Akhir ini.
2. Dr Jamari, ST, MT selaku Dosen Wali, yang telah memberikan perhatian dan wejangan selama penyusunan menuntut ilmu di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Diponegoro.
3. Seluruh Dosen Teknik Mesin Universitas Diponegoro Semarang yang telah menunaikan kewajibannya dalam menyampaikan ilmu yang bermanfaat kepada penulis.

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, Juli 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	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
NOMENKLATUR	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang Masalah.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penulisan	3
1.4. Batasan Masalah.....	4
1.5. Metode Penyelesaian Masalah	4
1.6. Sistematika Penulisan	5
BAB II DASAR TEORI	6
2.1. Pendahuluan.....	6
2.2. Aspek Aeroelastisitas dalam Perancangan <i>Rotor Blade</i> Helikopter	9

2.3. Aeroelastik Dinamik <i>Flutter</i>	10
2.4. Persamaan Gerak <i>Flutter</i>	13
2.5. Dinamika Struktur <i>Rotor Blade</i>	15
2.6. Gaya dan Momen Aerodinamik Tak Tunak	16
2.7. Metode Analisa <i>Flutter</i>	18
BAB III ANALISA STABILITAS <i>FLUTTER ROTOR BLADE</i>	19
3.1. Formulasi Metode K	19
3.2. Penentuan Frekuensi Natural dan Modus Ragam	20
3.2.1. Metode Holzer untuk Frekuensi Natural dan Modus Ragam Torsi	21
3.2.2. Metode Myklestad-Prohl untuk Frekuensi Natural dan Modus Ragam Bending	23
3.3. Penentuan Gaya dan Momen Aerodinamik Tak Tunak	26
3.4. Prosedur Analisa	27
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	36
4.1. Pemodelan dan Validasi	36
4.2. Perhitungan Kecepatan <i>Flutter</i>	37
4.3. Perhitungan Kecepatan <i>Flutter</i> untuk Variasi Letak Pusat Massa (CG)	38
4.4. Perhitungan Kecepatan <i>Flutter</i> untuk Variasi Kecepatan Putar <i>Rotor</i>	45
4.5. Perhitungan Kecepatan <i>Flutter</i> untuk Variasi Nilai GJ/EI	49
4.5.1. Nilai GJ/EI untuk lebih dari satu	49
4.5.2. Nilai GJ/EI untuk kurang dari satu	54
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	58
5.1. Kesimpulan	58
5.2. Saran	58
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN	61

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Karakteristik <i>rotor blade</i> UH-60.....	36
Tabel 4.2	Parameter <i>rotor blade</i> UH-60	36
Tabel 4.3	Perbandingan frekuensi natural <i>rotor blade</i>	37
Tabel 4.4	Kecepatan <i>flutter rotor blade</i>	43
Tabel 4.5	Perbandingan kecepatan <i>flutter</i>	44
Tabel 4.6	Kecepatan <i>flutter</i> dan kecepatan putar radial <i>rotor blade</i>	48
Tabel 4.7	Kecepatan <i>flutter rotor blade</i> terhadap nilai GJ/EI	52
Tabel 4.8	Frekuensi natural (dalam rad/s).....	53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Bagian-bagian helikopter.....	6
Gambar 2.2	Penampang <i>rotor blade</i> helikopter	7
Gambar 2.3	Gerakan <i>collective control</i> dengan <i>collective pitch</i>	8
Gambar 2.4	Gerakan <i>cyclic control</i> dengan <i>cyclic pitch</i>	8
Gambar 2.5	Skema bidang aeroelastisitas	10
Gambar 2.6	Kondisi sebelum <i>flutter</i>	11
Gambar 2.7	Kondisi saat <i>flutter</i>	11
Gambar 2.8	Kondisi setelah <i>flutter</i>	12
Gambar 2.9	Plot diagram <i>flutter</i> kecepatan terhadap frekuensi	12
Gambar 2.10	Plot diagram <i>flutter</i> kecepatan terhadap redaman	13
Gambar 2.11	Penampang dua dimensi <i>rotor blade</i>	13
Gambar 3.1	Model <i>lumped-mass</i> dari batang kantilever	20
Gambar 3.2	Diagram benda bebas untuk segmen gumpalan-massa berputar	21
Gambar 3.3	Diagram benda bebas dari elemen gumpalan-massa <i>blade</i>	24
Gambar 4.1	Plot koefisien redaman terhadap kecepatan tip dan frekuensi terhadap kecepatan tip.....	38
Gambar 4.2	Ketika CG <i>offset</i> adalah nol.....	39
Gambar 4.3	Ketika CG <i>offset</i> 0,5b	40
Gambar 4.4	Ketika CG <i>offset</i> 0,75b	40
Gambar 4.5	Ketika CG <i>offset</i> 0,80b	41
Gambar 4.6	Ketika CG <i>offset</i> 0,85b	41
Gambar 4.7	Ketika CG <i>offset</i> 0,90b	42
Gambar 4.8	Ketika CG <i>offset</i> 0,95b	42
Gambar 4.9	Ketika CG <i>offset</i> 1b	40
Gambar 4.10	Grafik CG <i>offset</i> terhadap Kecepatan <i>flutter</i>	44

Gambar 4.11 Kecepatan putar 200 RPM atau ($\Omega=20,94$ rad/s)	45
Gambar 4.12 Pada kecepatan putar 220 RPM atau ($\Omega=23,04$ rad/s)	46
Gambar 4.13 Pada kecepatan putar 240 RPM atau ($\Omega=25,13$ rad/s)	46
Gambar 4.14 Pada kecepatan putar 260 RPM atau ($\Omega=27,23$ rad/s)	47
Gambar 4.15 Pada kecepatan putar 280 RPM atau ($\Omega=29,32$ rad/s)	47
Gambar 4.16 Pada kecepatan putar 300 RPM atau ($\Omega=31,42$ rad/s)	48
Gambar 4.17 Grafik kecepatan putar terhadap kecepatan <i>flutter</i>	49
Gambar 4.18 Pada nilai GJ/EI adalah 2.....	50
Gambar 4.19 Pada nilai GJ/EI adalah 3.....	51
Gambar 4.20 Pada nilai GJ/EI adalah 4.....	51
Gambar 4.21 Pada nilai GJ/EI adalah 5.....	52
Gambar 4.22 Grafik kecepatan <i>flutter</i> terhadap nilai GJ/EI > 1.....	53
Gambar 4.23 Pada nilai GJ/EI adalah 0,8.....	54
Gambar 4.24 Pada nilai GJ/EI adalah 0,6.....	55
Gambar 4.25 Pada nilai GJ/EI adalah 0,4.....	55
Gambar 4.26 Pada nilai GJ/EI adalah 0,2.....	56
Gambar 4.27 Grafik kecepatan <i>flutter</i> terhadap nilai GJ/EI < 1.....	56

NOMENKLATUR

A	Bentuk aerodinamik dalam persamaan <i>flutter</i>	-
a	Non-dimensi letak sumbu elastik dari setengah <i>chord</i>	-
AC	Pusat aerodinamik	-
b	Semi- <i>chord</i> ($c/2$)	m
c	<i>Chord</i>	m
C	Koefisien redaman aerodinamik struktur	-
C(k)	Fungsi Theodorsen	-
CG	Pusat massa	-
cgea	Jarak antara letak CG dan letak EA	m
C_n, C_{n+1}	Tegangan lokal dari segmen <i>blade</i>	N
D	Fungsi dissipasi	
d	Panjang tiap segmen/elemen <i>rotor blade</i>	m
e	Offset/panjang engsel	m
EA	Sumbu elastik pada 25% <i>chord</i>	-
EI	Kekakuan struktur bending	$N.m^2$
F(k)	Bagian riil dari fungsi Theodorsen	-
g, g_h, g_α	Koefisien redaman struktur	-
G(k)	Bagian imajiner dari fungsi Theodorsen	-
GJ	Kekakuan struktur torsi	$N.m^2$
h	Perpindahan translasi (bending/ <i>heaving</i>)	m
$H_n^{(2)}(k)$	Fungsi Hankel jenis kedua dari orde ke- n	-
l_n, l_{n+1}	Jarak antara konsentrasi massa n dan $n+1$	m
I_α	Momen inersia polar massa	$Kg.m/m$
$I_{\alpha 1}, I_{\alpha 2}$	Momen inersia polar massa general	$Kg.m/m$
$J_n(k)$	Fungsi Bassel jenis pertama dari orde ke- n	-
k	Frekuensi reduksi	-

k_{kritis}	Frekuensi reduksi ketika redaman (g_i) bernilai nol	-
K_a	Radius polar gerakan berputar	m
L'	Gaya <i>Lift</i> (angkat) per unit <i>span rotor blade</i>	N
L_h	Komponen gaya aerodinamik bending	-
L_α	Komponen gaya aerodinamik torsi	-
m	Massa <i>rotor blade</i> persatuan panjang	kg
M'	Momen per unit <i>span rotor blade</i>	N.m
M_h	Koefisien momen aerodinamik karena bending	-
M_n, M_{n+1}	Momen bending segmen <i>blade</i> (metode Myklestad-Prohl)	N.m
M_α	Koefisien momen aerodinamik karena torsi	-
M_1, M_2, M_3	Bentuk massa umum tiap derajat kebebasan	kg
n	1, 2, 3,	-
Q_h, Q_α	Bentuk gaya-gaya umum untuk <i>rotor blade</i>	
Q_n	Bentuk gaya umum ke- n	
q_n	Koordinat normal ke- n	-
R	Panjang <i>blade</i>	m
S_n, S_{n+1}	Gaya geser dari segmen <i>blade</i> (metode Myklestad-Prohl)	N
S_α	Momen statik terhadap sumbu elastik	N.m
$S_{\alpha 11} \rightarrow S_{\alpha 32}$	Bentuk momen statik umum	N.m
T	Energi Kinetik	$\text{Kg.m}^2/\text{s}$
T_n, T_{n+1}	Momen torsi dari segmen <i>blade</i> (metode Holzer)	N
U	Energi Potensial	N.m
v	Kecepatan <i>free-stream</i>	m/s
V_{fwd}	kecepatan terbang helikopter	m/s
V_{FL}	Kecepatan <i>flutter</i>	m/s
V_{tip}	Kecepatan tip helikopter	m/s
$Y_n(k)$	Fungsi Bessel jenis kedua dari orde ke- n	-
Z	Nilai eigen kompleks	-

z_n, z_{n+1}	Defleksi vertikal segmen <i>blade</i> (metode Myklestad-Prohl)	m
α	Perpindahan rotasi (torsi/ <i>pitching</i>)	rad
β_n, β_{n+1}	Sudut defleksi vertikal segmen <i>blade</i>	rad
ϕ_h	<i>Mode shape</i> bending	-
ϕ_n, ϕ_{n+1}	Deformasi torsional (metode Holzer)	-
ϕ_α	<i>Mode shape</i> torsi	-
Ω	Kecepatan putar <i>rotor blade</i>	Rad/s
ρ	Massa jenis udara	Kg/m ³
μ	Massa <i>rotor blade</i> persatuan panjang	Kg ² /m ²
λ	Akar-akar dari solusi nilai eigen	-
θ_n	Sudut <i>pitch rotor blade</i>	rad
θ_0	Sudut <i>pitch</i> pangkal (<i>root</i>)	rad
θ_B	Sudut <i>twist</i> geometri <i>rotor blade</i>	rad
ω	Frekuensi osilasi	Rad/s
ω_h	Frekuensi natural bending	Rad/s
ω_α	Frekuensi natural torsi	Rad/s
ω_{kritis}	Frekuensi pada redaman (g_i) bernilai nol	Rad/s