



UNIVERSITAS DIPONEGORO

DISAIN KONTROL UNTUK *AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE*

TUGAS AKHIR

FATURRAKHMAN KHAIRAN

L2E 006 039

FAKULTAS TEKNIK

JURUSAN TEKNIK MESIN

SEMARANG

DESEMBER 2011

TUGAS SARJANA

Diberikan kepada :
Nama : Faturrahman Khairan
N I M : L2E 006 039
Pembimbing : Joga Dharma Setiawan, B.Sc., M.Sc., Ph.D
Co. Pembimbing : Dr. Achmad Widodo, ST, MT
Jangka waktu : 1 (satu) tahun
Judul : Desain Kontrol Posisi untuk *Autonomous Underwater Vehicle*
Isi tugas :

1. Mengkaji literatur tentang dinamika *Autonomous Underwater Vehicle* dan membuat simulasi menggunakan *Matlab/Simulink*.
2. Memodelkan *Autonomous Underwater Vehicle* ke dalam blok diagram menggunakan *MATLAB/Simulink*.
3. Membuat model terlinierisasi dari dinamika non linear *Autonomous Underwater Vehicle* menggunakan *Matlab/Simulink*
4. Membuat desain sistem kontrol linear *Autonomous Underwater Vehicle* menggunakan metode *Pole Placement*.
5. Membuat simulasi hasil desain sistem control posisi/manuver, menganalisa kestabilan dan membuat hasil simulasi dengan *Virtual Reality*.

Semarang, 19 Desember 2011

Pembimbing,



Joga Dharma Setiawan, B. Sc. M. Sc. PhD
NIP. 196811102005011001

Co. Pembimbing,



Dr. Achmad Widodo, ST, MT
NIP. 197307021999031001

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

NAMA : FATURRAKHMAN KHAIRAN

NIM : L2E006039

Tanda Tangan : 


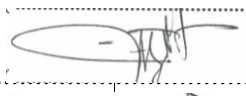
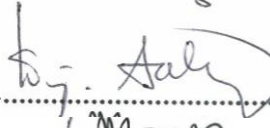
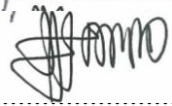
Tanggal : 19 DESEMBER 2011

HALAMAN PENGESAHAN

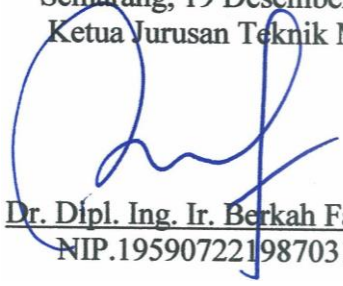
Tugas Sarjana ini diajukan oleh :
NAMA : FATURRAKHMAN KHAIRAN
NIM : L2E006039
Jurusan/Program Studi : TEKNIK MESIN
Judul Tugas Sarjana : Disain Kontrol Untuk *Autonomous Underwater Vehicle*

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

TIM PENGUJI

Pembimbing I : Joga Dharma Setiawan, MSc. PhD. ()
Pembimbing II : Dr. Achmad Widodo, ST.,MT. ()
Penguji : Ir. Djoeli Satridjo, MT. ()
Penguji : Ir. Sri Nugroho, ST, MT. ()

Semarang, 19 Desember 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 sivitas akademika Universitas Diponegoro, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Faturrahman Khairan
NIM : L2E006039
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 :

DISAIN KONTROL UNTUK *AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE*

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 : 19 Desember 2011
Yang menyatakan



(Faturrahman Khairan)
NIM : L2E006039

ABSTRAK

Kontrol kestabilan sangat diperlukan pada implementasi *autonomous underwater vehicle* (AUV). Kestabilan AUV dapat dicapai dengan menggunakan sistem kontrol *closed loop*. Pemodelan AUV menggunakan parameter Remus 100 yang dimiliki dari *Woods Hole Oceanographic Institution* (WHOI). Model AUV mempunyai nilai koefisien-koefisien gaya dan momen seperti hidrostatika, hidrodinamika, massa tambahan, dan kontrol masukan yang dipengaruhi oleh propulsi, 2 sirip *rudder* dan 2 sirip *stern*. Nilai koefisien-koefisien suatu gaya dan momen AUV dimodelkan menjadi blok diagram di dalam *MATLAB/Simulink*. Model nonlinier dalam penelitian ini dibandingkan dengan model nonlinier dalam literatur yang dipublikasi WHOI. Sistem kontrol dibuat berdasarkan model nonlinier AUV yang telah dilinierkan pada kondisi kecepatan 1.54 m/s. Penelitian ini menggunakan metode *pole placement* yang mana disain kontrol *pole placement* diperoleh dari matriks *state space*. Perintah masukan *doublet* diberikan untuk menguji *robustness*. Disain kontrol *pole placement* selalu menghasilkan sistem yang stabil pada dinamika AUV. Visualisasi 3D pada *virtual reality* (VR) sangat membantu memberikan ilustrasi kondisi menyelam yang sebenarnya.

Kata kunci : *AUV, pole placement, kestabilan*

ABSTRACT

Stabilization control is important in an autonomous underwater vehicle (AUV). Its stability can be achieved by using closed loop control system. Modeling of AUV uses the parameter of Remus 100 which is owned by the Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI). AUV model has coefficient values for force and moment such as hydrostatics, hydrodynamics, added mass, and control inputs influenced by propeller, two fins of rudder and stern. Coefficient values of force and moment AUV are modeled into the block diagram in MATLAB/Simulink. Nonlinear model in this research compared with the nonlinear model from the literature published by WHOI. Control system is designed based on nonlinear AUV model that has been linearized at velocity condition of 1.54 m/s. This research uses the pole placement method in which the control design of pole placement is obtained from the matrix state space. Doublet input command is given to test robustness. It always results to good stability of the system in AUV dynamic. 3D visualization in virtual reality (VR) is helpful to illustrate that represents the actual diving conditions.

Keywords : AUV, pole placement, stabilization

HALAMAN PERSEMBAHAN

Untuk Ayah, Ibu dan kedua Kakakku yang telah membimbingku dengan baik

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Halaman Tugas Sarjana	ii
Halaman Pernyataan	iii
Halaman Pengesahan	iv
Abstrak	vi
Halaman Persembahan	viii
Kata Pengantar.....	ix
Daftar Isi.....	x
Daftar Tabel.....	xiii
Daftar Gambar	xiv
Nomenklatur	xviii

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penulisan	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Metodologi Penelitian	4
1.5 Sistematika Penulisan Laporan.....	4

BAB II DASAR TEORI

2.1 Spesifikasi AUV	5
2.1.1 Lambung (Hull) AUV	6
2.1.2 Sonar Transducer	7
2.1.3 Kontrol Fins	8
2.1.4 Vehicle Weight and Buoyancy	9
2.2 Pemodelan Kinematika.....	9
2.3 Pemodelan Dinamika.....	13

2.4 Gaya dan Momen Hidrostatika.....	15
2.5 Gaya Hidrodinamika.....	16
2.5.1 Drag.....	17
2.5.1.1 Axial Drag.....	18
2.5.1.2 Crossflow Drag.....	18
2.5.1.3 Rolling Drag.....	19
2.5.2 Massa Tambahan.....	19
2.5.2.1 Massa Tambahan Axial.....	19
2.5.2.2 Massa Tambahan Crossflow.....	19
2.5.2.3 Massa Tambahan Rolling.....	19
2.5.2.4 Massa Tambahan Cross-Terms.....	19
2.5.3 Lift.....	20
2.5.3.1 Gaya dan Momen Body Lift.....	20
2.5.3.2 Gaya dan Momen Fin Lift.....	20
2.6 Gaya dan Momen Propulsi.....	20
2.7 Total Gaya dan Momen.....	20
2.8 Sistem Kontrol.....	21
2.8.1 Klasifikasi Sistem Kontrol.....	21
2.8.1 Ruang-Keadaan (<i>State Space</i>).....	23
2.9 Controllability dan Observability.....	26
2.10 Disain Penempatan-Kutub (<i>Pole Placement</i>).....	26
2.11 Kondisi Respon Dinamik.....	28
2.12 Eigenvalue Sistem Orde Tinggi.....	29

BAB III PEMODELAN DINAMIKA NONLINEAR AUV

3.1 Pemodelan Sistem.....	31
3.2 Kinematika AUV.....	32
3.3 Dinamika AUV.....	33
3.3.1 Pemodelan Dinamika Gaya dan Momen Hidrostatika.....	33

3.3.2	Pemodelan Dinamika Gaya dan Momen Hidrodinamika.....	33
3.3.3	Pemodelan Dinamika Massa Tambahan.....	34
3.3.4	Pemodelan Dinamika Massa Tambahan Cross-Terms.....	35
3.3.5	Pemodelan Dinamika Gaya dan Momen Angkat Body AUV.....	35
3.3.6	Pemodelan Dinamika Gaya dan Momen Angkat Sirip AUV.....	36
3.4	Simulasi Respon Open Loop Pada Model Nonlinear.....	37
3.4.1	<i>Horizontal Plane Dynamic Nonlinear Model</i>	38
3.4.2	<i>Vehicle Pitching Up Nonlinear Model</i>	45
3.4.2	<i>Vehicle Pitching Down Nonlinear Model</i>	51
BAB IV	LINEARISASI DAN ANALISA KESTABILAN	
4.1	Model Linier AUV.....	58
4.2	Kontrol Kecepatan.....	58
4.2.1	Desain Kontrol Kecepatan Umpan Balik <i>Pole Placement</i>	61
4.3	Kontrol Kedalaman.....	63
4.3.1	Desain Kontrol Kedalaman Umpan Balik <i>Pole Placement</i>	66
4.4	Kontrol Belokan.....	69
4.4.1	Desain Kontrol Belokan Umpan Balik <i>Pole Placement</i>	72
4.5	<i>Doublet Response</i>	75
4.7	Simulasi Dinamika AUV dengan <i>Virtual Reality Toolbox</i>	77
BAB V	PENUTUP	
5.1	Kesimpulan.....	79
5.2	Saran.....	79
DAFTAR PUSTAKA.....		81
LAMPIRAN		
Lampiran A.....		82
Lampiran B.....		90

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Spesifikasi AUV Remus	5
Tabel 2.2	Remus Fin Parameter	9
Tabel 2.3	Polinomial Karakteristik ITAE	30
Tabel 3.1	REMUS parameter model dinamika AUV	37
Tabel 4.1	<i>Pole-Zero Map Open Loop Kecepatan Surge</i>	60
Tabel 4.2	<i>Pole dan Matriks Gain Kecepatan Surge</i>	61
Tabel 4.3	<i>Pole-Zero Map Closed Loop Kecepatan Surge</i>	62
Tabel 4.4	<i>Pole-Zero Map Open Loop Diving</i>	65
Tabel 4.5	<i>Pole dan Matriks Gain Diving</i>	67
Tabel 4.6	<i>Pole-Zero Map Closed Loop Diving</i>	68
Tabel 4.7	<i>Pole-Zero Map Open Loop Steering</i>	71
Tabel 4.8	<i>Pole dan Matriks Gain Steering</i>	73
Tabel 4.9	<i>Pole-Zero Map Closed Loop Steering</i>	74

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Remus 100 AUV	2
Gambar 2.1	Myring hull profile dan bagian AUV	7
Gambar 2.2	<i>Sonar Trasducer</i> AUV	8
Gambar 2.3	Kontrol <i>Fins</i> AUV	8
Gambar 2.4	Kerangka tetap benda AUV dan kerangka inersia bumi	10
Gambar 2.5	Urutan rotasi untuk transformasi	12
Gambar 2.6	Posisi mengapung pada kapal selam	16
Gambar 2.7	Posisi menyelam pada kapal selam	16
Gambar 2.8	Grafik linearisasi.....	22
Gambar 2.9	Diagram blok persamaan ruang keadaan.....	24
Gambar 2.10	Perbandingan karakteristik polinomial baru.....	30
Gambar 3.1	Model Simulink AUV	31
Gambar 3.2	Model Kecepatan linear Transformasi Koordinat Euler Angle.....	32
Gambar 3.3	Pemodelan gaya dan momen hidrostatika	33
Gambar 3.4	Pemodelan gaya dan momen hidrodinamika.....	34
Gambar 3.5	Pemodelan massa tambahan	34
Gambar 3.6	Pemodelan massa tambahan <i>cross-terms</i>	35
Gambar 3.7	Pemodelan gaya dan momen angkat pada body AUV	36
Gambar 3.8	Pemodelan gaya dan momen angkat pada sirip.....	36
Gambar 3.9	Grafik hubungan posisi terhadap waktu	39
Gambar 3.10	Grafik hubungan posisi terhadap waktu simulasi AUV	39
Gambar 3.11	Grafik hubungan kecepatan terhadap waktu	40
Gambar 3.12	Grafik hubungan kecepatan terhadap waktu simulasi AUV	40
Gambar 3.13	Grafik hubungan posisi sudut terhadap waktu	41
Gambar 3.14	Grafik hubungan posisi sudut terhadap waktu simulasi AUV	41
Gambar 3.15	Grafik hubungan kecepatan sudut terhadap waktu.....	42
Gambar 3.16	Grafik hubungan kecepatan sudut terhadap waktu simulasi AUV.....	42

Gambar 3.17	Grafik hubungan gaya keseluruhan terhadap waktu.....	43
Gambar 3.18	Grafik hubungan gaya keseluruhan terhadap waktu simulasi AUV.....	43
Gambar 3.19	Grafik hubungan momen keseluruhan terhadap waktu	44
Gambar 3.20	Grafik hubungan momen keseluruhan terhadap waktu simulasi AUV	44
Gambar 3.21	Grafik hubungan posisi terhadap waktu	45
Gambar 3.22	Grafik hubungan posisi terhadap waktu simulasi AUV	46
Gambar 3.23	Grafik hubungan kecepatan terhadap waktu	46
Gambar 3.24	Grafik hubungan kecepatan terhadap waktu simulasi AUV	47
Gambar 3.25	Grafik hubungan posisi sudut terhadap waktu	47
Gambar 3.26	Grafik hubungan posisi sudut terhadap waktu simulasi AUV	48
Gambar 3.27	Grafik hubungan kecepatan sudut terhadap waktu.....	48
Gambar 3.28	Grafik hubungan kecepatan sudut terhadap waktu simulasi AUV.....	49
Gambar 3.29	Grafik hubungan gaya keseluruhan terhadap waktu.....	49
Gambar 3.30	Grafik hubungan gaya keseluruhan terhadap waktu simulasi AUV.....	50
Gambar 3.31	Grafik hubungan momen keseluruhan terhadap waktu	50
Gambar 3.32	Grafik hubungan momen keseluruhan terhadap waktu simulasi AUV	51
Gambar 3.33	Grafik hubungan posisi terhadap waktu	52
Gambar 3.34	Grafik hubungan posisi terhadap waktu simulasi AUV	52
Gambar 3.35	Grafik hubungan kecepatan terhadap waktu	53
Gambar 3.36	Grafik hubungan kecepatan terhadap waktu simulasi AUV	53
Gambar 3.37	Grafik hubungan posisi sudut terhadap waktu	54
Gambar 3.38	Grafik hubungan posisi sudut terhadap waktu simulasi AUV	54
Gambar 3.39	Grafik hubungan kecepatan sudut terhadap waktu.....	55
Gambar 3.40	Grafik hubungan kecepatan sudut terhadap waktu simulasi AUV.....	55
Gambar 3.41	Grafik hubungan gaya keseluruhan terhadap waktu.....	56
Gambar 3.42	Grafik hubungan gaya keseluruhan terhadap waktu simulasi AUV.....	56
Gambar 3.43	Grafik hubungan momen keseluruhan terhadap waktu	57
Gambar 3.44	Grafik hubungan momen keseluruhan terhadap waktu simulasi AUV	57
Gambar 4.1	Model dinamika AUV untuk linierisasi kecepatan <i>surge</i>	59

Gambar 4.2	<i>Pole-Zero Map Open Loop</i> Kecepatan Surge.....	60
Gambar 4.3	Respon <i>open loop</i> pada kecepatan Surge	60
Gambar 4.4	<i>Pole-Zero Map Closed Loop</i> Kecepatan Surge	62
Gambar 4.5	Respon <i>closed loop</i> pada kecepatan Surge	62
Gambar 4.6	Model dinamika AUV untuk linierisasi <i>diving</i>	64
Gambar 4.7	<i>Pole-Zero Map Open Loop</i> <i>diving</i>	64
Gambar 4.8	Respon <i>open loop</i> pada kecepatan sudut <i>pitch</i>	65
Gambar 4.9	Respon <i>open loop</i> pada sudut <i>pitch</i>	66
Gambar 4.10	Respon <i>open loop</i> pada kedalaman	66
Gambar 4.11	<i>Pole-Zero Map Closed Loop</i> <i>diving</i>	67
Gambar 4.12	Respon <i>closed loop</i> pada kecepatan sudut <i>pitch</i>	68
Gambar 4.13	Respon <i>closed loop</i> pada sudut <i>pitch</i>	68
Gambar 4.14	Respon <i>closed loop</i> pada kedalaman.....	69
Gambar 4.15	Model dinamika AUV untuk linierisasi <i>steering</i>	70
Gambar 4.16	<i>Pole-Zero Map Open Loop</i> <i>steering</i>	71
Gambar 4.17	Respon <i>open loop</i> pada kecepatan sudut yaw.....	72
Gambar 4.18	Respon <i>open loop</i> pada sudut yaw.....	72
Gambar 4.19	<i>Pole-Zero Map Closed Loop</i> <i>steering</i>	73
Gambar 4.20	Respon <i>closed loop</i> pada kecepatan sudut yaw	74
Gambar 4.21	Respon <i>closed loop</i> pada sudut yaw	74
Gambar 4.22	<i>Input Doublet Response</i>	75
Gambar 4.23	Respon Terhadap <i>Doublet</i> pada kecepatan sudut <i>pitch</i>	75
Gambar 4.24	Respon Terhadap <i>Doublet</i> pada sudut <i>pitch</i>	76
Gambar 4.25	Respon Terhadap <i>Doublet</i> pada kedalaman	76
Gambar 4.26	Respon Terhadap <i>Doublet</i> pada kecepatan sudut yaw.....	76
Gambar 4.27	Respon Terhadap <i>Doublet</i> pada sudut yaw.....	77
Gambar 4.32	Simulasi dinamika AUV dalam <i>virtual reality</i>	77
Gambar 4.33	<i>Instrument small</i> AUV dalam <i>virtual reality</i>	78
Gambar B.1	Grafik respon <i>diving control</i>	92

Gambar B.2	Grafik respon <i>forward velocity control</i>	95
Gambar B.3	Grafik respon <i>steering control</i>	96

NOMENKLATUR

<u>Simbol</u>	<u>Keterangan</u>	<u>Satuan</u>
<i>A</i>	<i>System matrix</i> pada matriks <i>state space</i>	
<i>B</i>	<i>Input matrix</i> pada matriks <i>state space</i>	
<i>C</i>	<i>Output matrix</i> pada matriks <i>state space</i>	
<i>D</i>	<i>Matriks yang mewakili direct coupling</i> antara <i>input</i> dan <i>output</i>	
<i>Bo</i>	<i>Gaya Bouyancy</i>	N
<i>Ixx</i>	<i>Moments of Inertia wrt origin at CB</i>	kg.m ²
<i>Iyy</i>	<i>Moments of Inertia wrt origin at CB</i>	kg.m ²
<i>Izz</i>	<i>Moments of Inertia wrt origin at CB</i>	kg.m ²
<i>Kpdot</i>	<i>Rolling Added Mass</i>	kg.m ² /rad
<i>Kpp</i>	<i>Rolling Drag</i>	kg.m ² /rad ²
<i>Kprop</i>	<i>Propeller Torque</i>	N.m
<i>m</i>	<i>Massa AUV</i>	kg
<i>Mqdot</i>	<i>Koefisien Massa Tambahan</i>	kg.m ² /rad
<i>Mqq</i>	<i>Koefisien Crossflow Drag</i>	kg.m ² /rad ²
<i>Mrp</i>	<i>Koefisien Massa Tambahan Cross-Terms</i>	kg.m ² /rad ²
<i>Muq</i>	<i>Koefisien Massa Tambahan dan kontrol fin</i>	
<i>Muqa</i>	<i>Massa Tambahan</i>	kg.m/rad
<i>Muqf</i>	<i>Kontrol fin</i>	kg.m/rad
<i>Muuds</i>	<i>Kontrol fin</i>	kg/rad
<i>Muw</i>	<i>Koefisien Massa Tambahan Cross Terms, Momen Body lift dan kontrol fin</i>	
<i>Muwa</i>	<i>Koefisien Massa Tambahan Cross Terms</i>	kg
<i>Muwf</i>	<i>Kontrol fin</i>	kg
<i>Muwl</i>	<i>Momen Body lift</i>	kg

Mvp	Koefisien Massa Tambahan <i>Cross Terms</i>	kg.m/rad
Mwdot	Koefisien Massa Tambahan	kg.m
Mww	Koefisien <i>Crossflow Drag</i>	kg
Npq	Koefisien Massa Tambahan <i>Cross Terms</i>	kg.m ² /rad ²
Nrdot	Koefisien Massa Tambahan	kg.m ² /rad
Nrr	Koefisien <i>Crossflow Drag</i>	kg.m ² /rad ²
Nur	Koefisien Massa Tambahan dan kontrol fin	
Nura	Koefisien Massa Tambahan <i>Cross Terms</i>	kg.m/rad
Nurf	Kontrol <i>fin</i>	kg.m/rad
Nuudr	Kontrol <i>fin</i>	kg/rad
Nuv	Koefisien Massa Tambahan <i>Cross Terms</i> , Momen <i>Body lift</i> dan kontrol <i>fin</i>	
Nuva	Koefisien Massa Tambahan <i>Cross Terms</i>	kg
Nuvf	Kontrol <i>fin</i>	kg
Nuyl	<i>Momen Body lift</i>	kg
Nvdot	Koefisien Massa Tambahan	kg.m
Nvv	Koefisien <i>Crossflow Drag</i>	kg
Nwp	Koefisien Massa Tambahan <i>Cross Terms</i>	kg.m/rad
po	Kecepatan sudut <i>roll</i>	rad/detik
phio	Sudut <i>pitch</i>	rad
PO	<i>Percent Overshoot</i>	
psio	Sudut <i>yaw</i>	rad
qo	Kecepatan sudut <i>roll</i>	rad/detik
ro	Kecepatan sudut <i>yaw</i>	rad/detik
rho	<i>Seawater density</i>	kg/m ³
Sw	<i>Hull Wetted Surface Area</i>	m ²
theta0	Sudut <i>pitch</i>	rad
ts	<i>Settling time</i>	detik

uo	Kecepatan <i>surge</i>	m/s
v	<i>Hull volume</i>	m ³
vo	kecepatan <i>sway</i>	m/s
W	Berat AUV	N
wo	Kecepatan <i>heave</i>	m/s
wn	Frekuensi pribadi	Hz
xo	Posisi perpindahan	m
xcb	Pusat <i>Buoyancy</i>	m
xcg	Pusat Gravitasi	m
xcp	<i>Center of pressure</i>	n/a
Xprop	<i>Propeller Max Thrust</i>	N
Xqq	Koefisien Massa Tambahan <i>Cross Terms</i>	kg.m/rad
Xrr	Koefisien Massa Tambahan <i>Cross Terms</i>	kg.m/rad
Xudot	Koefisien Massa Tambahan	kg
Xuu	Koefisien <i>Axial Drag</i>	kg/m
Xvr	Koefisien Massa Tambahan <i>Cross Terms</i>	kg/rad
Xwq	Koefisien Massa Tambahan <i>Cross Terms</i>	kg/rad
yo	Posisi perpindahan	m
ycb	Pusat <i>Buoyancy</i>	m
ycg	Pusat Gravitasi	m
Ypq	Koefisien Massa Tambahan <i>Cross Terms</i>	kg.m/rad
Yrdot	Koefisien Massa Tambahan	kg.m/rad
Yrr	Koefisien <i>Crossflow Drag</i>	kg.m/rad ²
Yur	Koefisien Massa Tambahan <i>Cross Terms</i> dan kontrol fin	
Yura	Massa Tambahan <i>Cross Terms</i>	kg/rad
Yurf	Kontrol <i>fin</i>	kg/rad
Yuudr	Kontrol <i>fin</i>	kg/(m.rad)
Yuv	Gaya <i>Body lift</i> dan kontrol fin	

Yuvf	Kontrol <i>fin</i>	kg/m
Yuvl	Gaya <i>Body lift</i>	kg/m
Yvdot	Koefisien Massa Tambahan	kg
Yvv	Koefisien <i>Crossflow Drag</i>	
Ywp	Koefisien Massa Tambahan <i>Cross Terms</i>	kg/rad
zo	Posisi perpindahan	m
zcb	Pusat <i>Buoyancy</i>	m
zcg	Pusat Gravitasi	m
zeta	Rasio Damping	
Zqdot	Koefisien Massa Tambahan	kg.m/rad
Zqq	Koefisien <i>Crossflow Drag</i>	kg.m/rad ²
Zrp	Koefisien Massa Tambahan <i>Cross Terms</i>	kg/rad
Zuq	Koefisien Massa Tambahan <i>Cross Terms</i> dan kontrol <i>fin</i>	
Zuqa	Koefisien Massa Tambahan <i>Cross Terms</i>	kg/rad
Zuqf	Kontrol <i>fin</i>	kg/rad
Zuuds	Kontrol <i>fin</i>	kg/(m.rad)
Zuw	Gaya <i>Body lift</i> dan kontrol <i>fin</i>	
Zuwf	kontrol <i>fin</i>	kg/m
Zuwl	Gaya <i>Body lift</i>	kg/m
Zvp	Koefisien Massa Tambahan <i>Cross Terms</i>	kg/rad
Zwdot	Koefisien Massa Tambahan	kg
Zww	Koefisien <i>Crossflow Drag</i>	kg.m/rad ²