

MODEL *NONLINEAR* DINAMIKA GERAK PADA *AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE* (AUV)

Faturrahman Khairan, Joga Dharma S., dan Mochammad Ariyanto

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik UNDIP

Jl. Prof. Soedarto Tembalang Semarang

e-mail: facthyuur@ymail.com

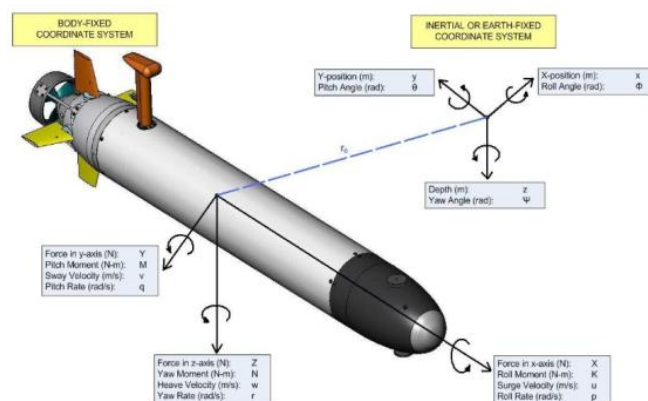
Abstrak

AUV adalah kendaraan bawah air yang mampu bergerak didalam air secara otomatis tanpa adanya kontrol langsung dari manusia, AUV dikenal sebagai *Unmanned Undersea Vehicles* (UUVs). Dalam aplikasinya AUV memberikan kontribusi bagi militer, industri maupun untuk bidang penelitian akademik dalam beberapa tahun ini. Salah satu contoh keuntungan menggunakan AUV yaitu, pada industri minyak dan gas juga memerlukan kemampuan untuk memeriksa pipa bawah laut, *realtime monitoring*, pemetaan daerah bawah laut, dan masih banyak yang lainnya. Pada paper ini menggunakan suatu model nonlinear 6 derajat kebebasan AUV jenis REMUS. AUV ini mempunyai suatu persamaan nonlinear orde tingkat 2. Pada model AUV ini terdapat gaya dan momen luar yang dihasilkan oleh hidrostatika, hidrodinamika, massa tambahan, dan dikendalikan oleh parameter masukan yaitu gaya dorong pada propeller dan pergerakan sudut 2 sirip pada rudder dan 2 sirip pada stern pada AUV. Nonlinear model tersebut disimulasikan menggunakan program bantu MATLAB/Simulink. Dalam simulasi ini akan di berikan input doublet pada sirip rudder untuk mengetahui responnya pada sistem open loop. Hasil dari simulink akan dihubungkan ke dunia Virtual reality, disini kita dapat melihat simulasi gerak AUV dalam format 3 dimensi yang akan membuat kita lebih mengerti tentang dinamika geraknya. Pada model nonlinear AUV dapat distabilkan dengan menggunakan sistem kontrol.

Kata kunci: AUV, input doublet, nonlinear model

1. PENDAHULUAN

AUV adalah kendaraan bawah air yang mampu bergerak didalam air secara otomatis tanpa adanya kontrol langsung dari manusia, AUV dikenal sebagai *Unmanned Undersea Vehicles* (UUVs). Dalam aplikasinya AUV memberikan kontribusi bagi militer, industri maupun untuk bidang penelitian akademik dalam beberapa tahun ini. Salah satu contoh keuntungan menggunakan AUV yaitu, pada industri minyak dan gas juga memerlukan kemampuan untuk memeriksa pipa bawah laut, *realtime monitoring*, pemetaan daerah bawah laut, dan masih banyak yang lainnya. Dalam beberapa tahun ini, banyak peneliti yang tertarik dibidang AUV. Pada umumnya AUV mempunyai bentuk geometri seperti torpedo. Hal ini bertujuan untuk mengefisiensikan suatu gaya hidrodinamika, ruang volume, dan juga dapat dikemudikan dengan baik.

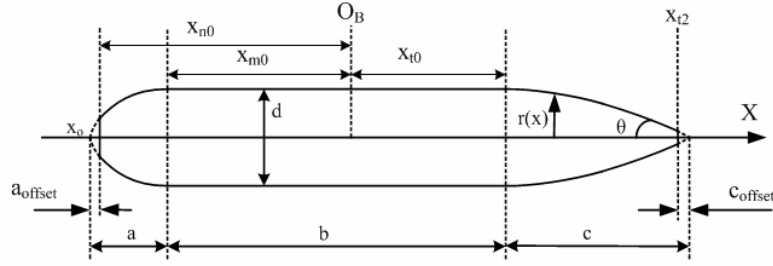


Gambar 1. kerangka acuan badan AUV dan kerangka acuan bumi

2. PEMODELAN MATEMATIKA AUV

Dalam pembahasan AUV ini mengadopsi dari lambung profil Myring (*Myring hull profile*) [5]. Jenis bentuk *hull* menyediakan ruangan dalam lebih banyak dan menjaga karakteristik

streamline luar bila dibandingkan dengan bentuk torpedo Bentuk lambung ini adalah simetris dan spesifikasi profil dijelaskan oleh persamaan distribusi radius sepanjang sumbu utama (persamaan 1 dan 2). Profil AUV semacam ini dapat dibagi menjadi 3 bagian yaitu: bagian hidung, bagian tengah dan bagian ekor.



Gambar 2. Myring hull profile dan bagian AUV [5]

$$R_n(x) = \frac{1}{2} d \left[1 - \left(\frac{x - a_{\text{offset}} - a}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

$$R_t(x) = \frac{1}{2} d - \left[\frac{3d}{2c^3} - \frac{\tan \theta}{c} \right] (x-l)^2 + \left[\frac{d}{c^3} - \frac{\tan \theta}{c^2} \right] (x-l_f)^3 \quad (2)$$

Dimana l_f adalah panjang *forward body*

$$l_f = a + b - a_{\text{offset}} \quad (3)$$

AUV ini mempunyai suatu persamaan nonlinear orde tingkat 2. Pada model AUV ini terdapat gaya dan momen luar yang dihasilkan oleh hidrostatika, hidrodinamika, massa tambahan, dan dikendalikan oleh parameter masukan yaitu gaya dorong pada *propeller* dan pergerakan sudut 2 sirip pada *rudder* dan 2 sirip pada *stern* pada AUV.

Untuk mendapatkan persamaan kinematika dari AUV, dibutuhkan persamaan acuan AUV ke acuan bumi, matriks transformasinya biasa dituliskan seperti dibawah ini [1],

$$V_x = u \cos \psi \cos \theta + v (-\sin \psi \cos \theta + \cos \psi \sin \theta \sin \phi) + w (\sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi)$$

$$V_y = u \sin \psi \cos \theta + v (\cos \psi \cos \theta + \sin \psi \sin \theta \sin \phi) + w (-\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi)$$

$$V_z = u(-\sin \theta) + v (\cos \theta \sin \phi) + w (\cos \theta \cos \phi) \quad (4)$$

Transformasi kecepatan rotasi koordinat yang kedua berkaitan antara koordinat *body-fixed* dan *earth-fixed* [1]:

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= p + (q \sin \phi + r \cos \phi) \tan \theta \\ \dot{\theta} &= q \cos \phi - r \sin \phi \\ \dot{\psi} &= (q \sin \phi + r \cos \phi) \sec \theta \end{aligned} \quad (5)$$

Kemudian untuk pemodelan dinamika dapat dimodelkan melalui 6 derajat kebebasan yaitu [1]:

$$\begin{aligned} \sum X &= m[\dot{u} + wq - vr - x_G (q^2 + r^2) + y_G (pq - \dot{r}) + z_G (pr + \dot{q})] \\ \sum Y &= m[\dot{v} + ur - wp - y_G (r^2 + p^2) + z_G (qr - \dot{p}) + x_G (qp + \dot{r})] \\ \sum Z &= m[\dot{w} + vp - uq - z_G (p^2 + q^2) + x_G (rp - \dot{q}) + y_G (rq + \dot{p})] \\ \sum K &= I_{xx} \dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr + m[y_G (\dot{w} + vp - uq) - z_G (\dot{v} + ur - wp)] \\ \sum M &= I_{yy} \dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})pr + m[z_G (\dot{u} + wq - vr) - x_G (\dot{w} + vp - uq)] \\ \sum N &= I_{zz} \dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m[x_G (\dot{v} + ru - pw) - y_G (\dot{u} + qw - rv)] \end{aligned} \quad (6)$$

2.1. Gaya dan momen hidrostatika

Gaya dan momen hidrostatika pada AUV merupakan hasil dari gabungan efek *buoyancy* dan berat pada AUV. Gaya berat pada AUV yaitu $W = mg$

Efek *buoyancy* yaitu $B = \rho Vg$, dimana ρ merupakan massa jenis fluida dan V sebagai volume total pada AUV [1].

$$\begin{aligned}
 X_{G-B} &= -g(m - \rho V) \sin \theta \\
 Y_{G-B} &= g(m - \rho V) \sin \phi \cos \theta \\
 Z_{G-B} &= g(m - \rho V) \cos \phi \cos \theta \\
 K_{G-B} &= g(m_{yG} - \rho V_{yB}) \cos \phi \cos \theta - (m_{zG} - \rho V_{zB}) \sin \phi \cos \theta \\
 M_{G-B} &= -g(m_{zG} - \rho V_{zB}) \sin \theta - g(m_{xG} - \rho V_{xB}) \cos \phi \cos \theta \\
 N_{G-B} &= g(m_{xG} - \rho V_{xB}) \sin \phi \cos \theta - g(m_{yG} - \rho V_{yB})
 \end{aligned} \tag{7}$$

2.2. Gaya dan momen hidrodinamika

Dalam proses pemodelan dinamika AUV, bagian dari analisis dan pemodelan hidrodinamika merupakan hal yang paling kompleks. Gaya hidrodinamika terkait dengan kecepatan dan percepatan pada AUV. Bahkan, untuk model pada gaya hidrodinamika adalah untuk menentukan koefisien yang relevan. Setelah mendapatkan nilai-nilai koefisien tersebut, kita dapat menghitung gaya hidrodinamika menurut rumus empiris jika kita telah diketahui kecepatan dan percepatan AUV. Selama mengalami perpindahan, gaya hidrodinamika pada AUV dapat diinterpretasikan menjadi 3 bagian, yaitu: gaya yang disebabkan oleh pertambahan massa, gaya hambat (*drag*) dan gaya angkat (*lift*) [2].

2.2.1. Gaya Drag

Untuk menghitung koefisien gaya *drag* menggunakan persamaan yang dirumuskan oleh Hoerner [3].

$$\begin{aligned}
 X_{u|u} &= -\frac{1}{2} \rho c_d A_f \\
 Y_{v|v} = Z_{w|w} &= -\frac{1}{2} \rho c_d \int_{x_t}^{x_{b2}} 2R(x) dx - 2 \left(\frac{1}{2} \rho S_{fin} c_{df} \right) \\
 M_{w|w} = -N_{v|v} &= \frac{1}{2} \rho c_d \int_{x_t}^{x_{b2}} 2R(x) dx - 2x_{fin} \left(\frac{1}{2} \rho S_{fin} c_{df} \right) \\
 Y_{r|r} = -Z_q |q| &= -\frac{1}{2} \rho c_d \int_{x_t}^{x_{b2}} 2R(x) dx - 2x_{fin} |x_{fin}| \left(\frac{1}{2} \rho S_{fin} c_{df} \right) \\
 Y_{q|q} = N_r |r| &= -\frac{1}{2} \rho c_d \int_{x_t}^{x_{b2}} 2R(x) dx - 2x_{fin}^3 \left(\frac{1}{2} \rho S_{fin} c_{df} \right) \\
 K_{p|p} &= Y_{v|v} r^3_{mean}
 \end{aligned} \tag{8}$$

2.2.2 Massa Tambahan

Massa tambahan merupakan pengukuran massa yang mengalami perpindahan ketika AUV mengalami percepatan. Gaya dan momen akan dijelaskan dibawah ini [6], [7]:

$$\begin{aligned}
 F_j &= -u_i m_{ji} - \varepsilon_{jkl} u_i \Omega_k m_{li} \\
 M_j &= -u_i m_{j+3,i} - \varepsilon_{jkl} u_i \Omega_k m_{l+3i} - \varepsilon_{jkl} u_i u_k m_{li}
 \end{aligned} \tag{9}$$

Dimana $i = 1,2,3,4,5$, dan 6

Sedangkan $j,k,l = 1,2$, dan 3

Karena bidang xy dan bidang xz -plane adalah simetris, maka matriks massa tambahan adalah sebagai berikut [1]:

$$\begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{v}} \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & M_{\dot{w}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{\dot{q}} & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & Y_{\dot{r}} & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.2.3. Gaya dan Momen Body Lift

Untuk menghitung koefisien gaya dan momen *body lift* menggunakan persamaan yang dirumuskan oleh Hoerner [4].

$$\begin{aligned} Y_{uvl} = Z_{uwl} &= -\frac{1}{2} \rho d^2 c_{y\dot{\phi}\beta} \\ M_{uvl} = -N_{uvl} &= -\frac{1}{2} \rho d^2 c_{y\dot{\phi}\beta} x_{cp} \end{aligned} \quad (11)$$

AUV dikendalikan dengan 2 *fin* horizontal atau bidang *stern*, 2 vertikal *fin* atau disebut *rudder*. Jadi perumusan pada koefisien gaya *fin lift* adalah:

$$\begin{aligned} Y_{uu\dot{\alpha}} &= -Y_{uvf} = \rho c_{L\alpha} S_{fin} \\ Z_{uu\dot{\alpha}} &= Z_{uwf} = -\rho c_{L\alpha} S_{fin} \\ Y_{urf} &= -Z_{uqf} = -\rho c_{L\alpha} S_{fin} x_{fin} \\ M_{uu\dot{\alpha}} &= M_{uwf} = \rho c_{L\alpha} S_{fin} x_{fin} \\ N_{uu\dot{\alpha}} &= -N_{uvf} = \rho c_{L\alpha} S_{fin} x_{fin} \\ M_{uqf} &= N_{urf} = \rho c_{L\alpha} S_{fin} x_{fin}^2 \end{aligned} \quad (12)$$

2.3. Gaya dan Momen Propulsi

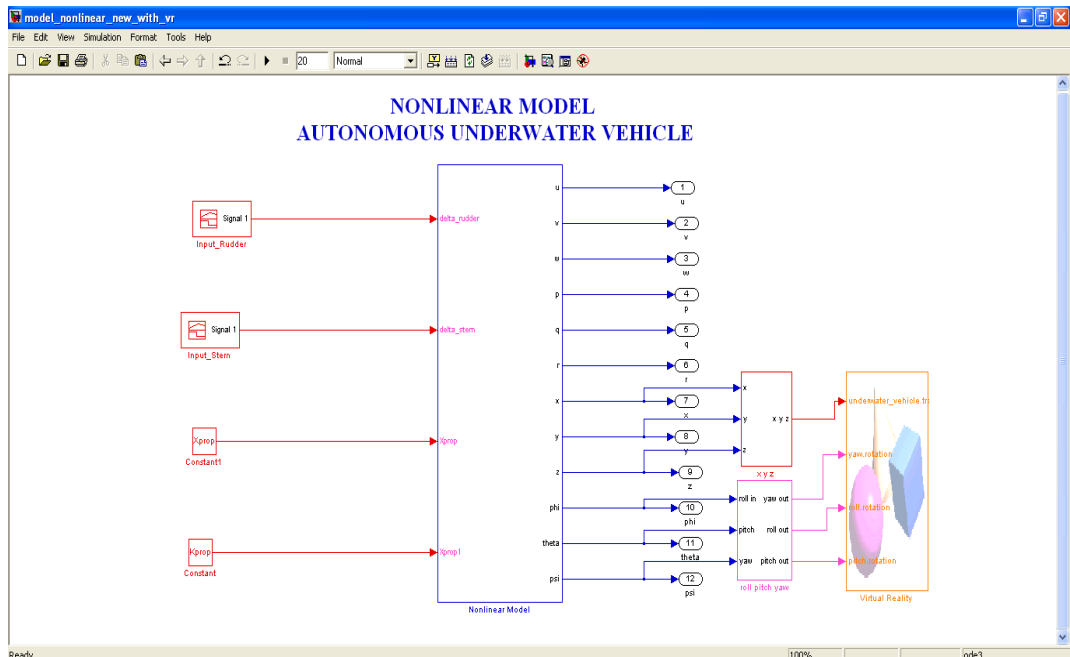
Gaya propulsi merupakan gaya dorong pada *propeller* AUV. Pada AUV jenis REMUS ini digunakan pada kecepatan 1.5 m/s dengan asumsi kecepatan dorong AUV ini stabil dan sesuai dengan gaya pada *axial drag*. Untuk menghitung suatu gaya dan momen dorong pada *propeller* yaitu:

$$\begin{aligned} X_{prop} &= X_{u|u} u |u| = 2.28 X_{u|u} \\ K_{prop} &= -K_{HS} = (y_g W - y_b B) \cos \phi \cos \theta + (z_g W - z_b B) \sin \phi \cos \theta \\ &= 0.995(y_g W - y_b B) - 0.093(z_g W - z_b B) \end{aligned} \quad (13)$$

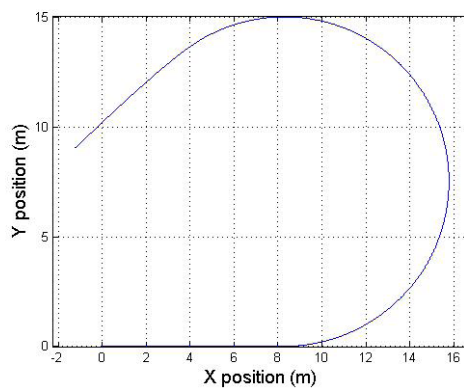
3. VERIFIKASI MODEL

Nonlinear model disimulasikan menggunakan program bantu MATLAB/Simulink. Dalam simulasi ini akan di berikan input doublet pada sirip *rudder* untuk mengetahui responnya pada sistem *open loop*. Hasil dari Simulink akan dihubungkan ke dunia *Virtual reality*, disini dapat dilihat simulasi gerak dinamika AUV dalam format 3 dimensi seperti pada gambar 3 berikut.

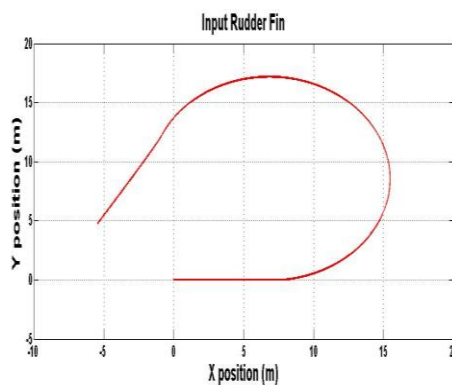
Pada pemodelan dinamika yang sudah dibangun dianalisa dengan perbandingan yang dihasilkan dari model Prestero. Hasil dari suatu perbandingan yaitu berupa harga *input doublet* pada masing-masing sirip *rudder* dan *stern*. Selain itu, diasumsikan bahwa gaya apung, gaya berat, gaya dorong *propeller* adalah konstan dan memodifikasi pada harga *input stern*. Pada gerak horizontal, *input stern* diberi nilai -8 pada saat 5 sampai 25 detik. Sedangkan, untuk gerak verikal, input rudder diberi nilai -4 pada saat 5 sampai 7 detik. Berikut ini adalah perbandingan hasil dari suatu grafik rudder pada gambar 4 dan 5 serta grafik stern pada gambar 6 dan 7 [2]:



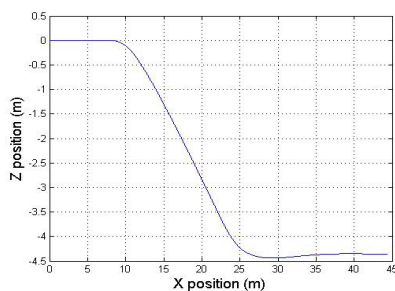
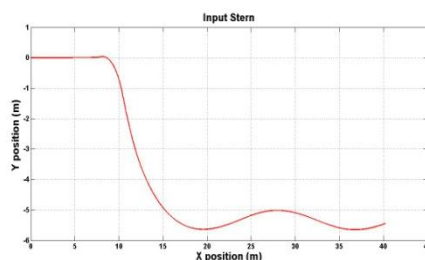
Gambar 3. Diagram Blok Simulink



Gambar 4. Lintasan AUV bidang X-Y dengan *Input Rudder* 'Model Prestero'



Gambar 5. Hasil Perbandingan Lintasan AUV bidang X-Y dengan *Input Rudder*

Gambar 6. Lintasan AUV bidang X-Z dengan *Input Stern* 'Model Presterero'Gambar 7. Hasil Perbandingan Lintasan AUV bidang X-Y dengan *Input Stern*

Untuk hasil analisa grafik pada bidang X-Y dan X-Z hampir sama dengan grafik model Presterero. Pada hasil grafik bidang X-Y dan X-Z terdapat adanya perbedaan pada lintasan. Hal ini disebabkan, nilai dari suatu parameter model dinamika sedikit berbeda.

4. KESIMPULAN

1. Model matematika dinamika gerak AUV telah dirumuskan dan disimulasikan berdasarkan model nonlinear. Model matematika tersebut selanjutnya dapat dilinearisasikan dan digunakan untuk menganalisis karakteristik sistem kontrol pada AUV tersebut.
2. Hasil grafik dari perbandingan pada lintasan bidang X-Y hampir sama dengan menggunakan model Presterero dengan memodifikasi nilai dari gaya dan momen hidrodinamik $Y_{r|r|} = 10.320 \text{ kg/m} \cdot \text{rad}^2$ dan $N_{r|r|} = -5000 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{rad}^2$
3. Pada hasil grafik dari perbandingan pada bidang lintasan bidang X-Z hampir sama dengan menggunakan model Presterero. Perbedaan ini terlihat bahwa hasil grafik terdapat osilasi, dikarenakan masih adanya efek dari gaya apung dan gaya berat.

5. DAFTAR PUSTAKA

1. T. Presterero, "Verification of A Six-Degree of Freedom Simulation Model for The REMUS AUV", *Master's thesis, MIT, Department of Ocean and Mechanical Engineering*, 2001.
2. Y. Chen, "Modular Modeling and Control for Autonomous Underwater Vehicle (AUV)", *Master's thesis, Master Of Engineering Department Of Mechanical Engineering National University Of Singapore*, 2007.
3. S.F. Hoerner, "Fluid Dynamic drag". *Published by author*, 1965.
4. S.F. Hoerner and V.B. Henry, "Fluid Dynamic Lift", *second edition*", *Published by author*, 1985.
5. D.F. Myring. *A theoretical study of body drag in subcritical axisymmetric flow. Aeronautical Quarterly*, 27(3):186-94, August 1976.
6. J. N. Newman. *Marine Hydrodynamics*. MIT Press, Massachusetts, 1977.
7. Thor 1. Fossen. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley & Sons, New York, 1994.