

SISTEM KONTROL KETINGGIAN UNTUK RUDAL ATAS AIR DENGAN FILTER PREDIKTIF

Rika Andiarti
Peneliti Bidang Kendali, Pustekwagan, LAPAN

ABSTRACT

A height control system for a sea-skimming missile is developed. By considering sea wave as a disturbance, a predictive filter is used to reduce this disturbance significantly. Simulation results show that the performance of the height control system using the filter meets the objectives for a sea-skimming missile effectively.

ABSTRAK

Sebuah sistem kontrol ketinggian untuk rudal atas air dikembangkan. Dengan menganggap gelombang laut sebagai gangguan (*noise*), sebuah filter prediktif digunakan untuk mengeliminasi gangguan ini. Performansi sistem kontrol ketinggian ini dibuktikan lewat simulasi, dan hasilnya menunjukkan bahwa sistem kontrol ketinggian dengan filter prediktif dapat memenuhi obyektivitas sebuah rudal atas air secara efektif.

1 PENDAHULUAN

Kebutuhan akan rudal dalam sebuah sistem pertahanan merupakan kebutuhan yang tak terbantahkan, baik dalam sistem pertahanan darat, laut, maupun sistem pertahanan udara. Indonesia sebagai negara kepulauan, sangat membutuhkan sistem pertahanan laut yang kuat. Selama ini pengadaan rudal-rudal tersebut sangat bergantung pada pihak asing.

Meskipun dirasakan adanya kebutuhan yang sangat tinggi terhadap rudal ini, penguasaan teknologinya tidaklah mudah. Dengan adanya pembatasan alih teknologi, penguasaan teknologi rudal di Indonesia mengalami hambatan. Tetapi hambatan ini tidak mengurangi semangat untuk tetap mengembangkan rudal, sebagai wujud usaha kemandirian bangsa dalam penguasaan teknologi pertahanan. Dan salah satu rudal yang perlu dikembangkan adalah rudal atas air yang berfungsi sebagai rudal anti kapal perang.

Rudal atas air, atau yang biasa dikenal dengan *sea-skimming missile* merupakan sebuah rudal yang terbang sangat rendah di atas laut. Rudal seperti ini biasanya menggunakan sebuah

altimeter radio untuk mengukur ketinggiannya dari permukaan laut. Seperti diketahui, sebuah altimeter mengukur ketinggian riil dari permukaan laut, dan bukannya ketinggian dari level laut (*sea level*). Dengan demikian, gelombang laut secara efektif akan mempengaruhi pembacaan altimeter, sehingga membuat rudal terbang mengikuti trayektori sejajar terhadap permukaan laut. Hal ini menyebabkan rudal harus mengeluarkan energi ekstra yang tidak perlu, dan memperbesar kemungkinan rudal tenggelam ke dalam laut.

Tujuan dari tulisan ini adalah untuk mempelajari sistem kontrol ketinggian dengan menggunakan sebuah filter yang didasarkan pada algoritma filter prediktif nonlinier, untuk mengestimasi ketinggian rudal di atas level laut. Analisis stabilitas untuk sistem lup tertutup dengan filter prediktif akan diberikan juga dengan menggunakan diagram Bode. Dan performansi sistem kontrol ketinggian akan dibuktikan lewat simulasi.

2 SISTEM KONTROL KETINGGIAN

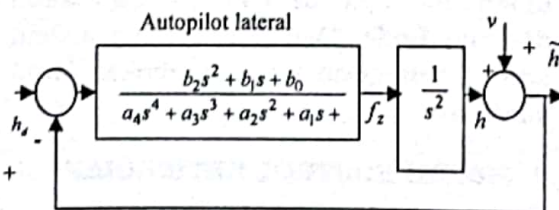
Di dalam paragraf ini, kita akan mengingat kembali desain sistem kontrol

ketinggian untuk sebuah rudal, di mana didalamnya berisi blok autopilot percepatan lateral dan sebuah blok integrator dobel untuk mendapatkan ketinggian dari informasi percepatan. Dan akan terlihat bahwa kompensator diperlukan untuk memenuhi stabilitas dan kecepatan tanggapan yang baik dari sistem kontrol ketinggian ini. Uji kestabilan sistem lup tertutup akan dilakukan dengan menggunakan diagram Bode.

2.1 Sistem Kontrol Ketinggian Dasar

Rudal atas air adalah sebuah senjata yang efektif untuk melawan sebuah kapal perang (*ships*), karena rudal jenis ini terbang sangat rendah (biasanya kurang dari 10 meter) di atas level laut. Hal ini dilakukan agar di satu sisi, rudal tidak terdeteksi oleh radar lawan, dan di sisi lain, rudal dapat menghancurkan kapal lawan. Rudal jenis ini biasanya menggunakan sebuah altimeter sebagai sensor ketinggian dari atas permukaan laut. Seperti diketahui, altimeter hanya mengukur ketinggian riil dari sebuah rudal di atas permukaan laut. Hal ini membuat rudal diminta untuk mengikuti pola ketinggian sejajar dengan gelombang laut, dan bukannya mengikuti pola ketinggian yang sejajar dengan level laut. Dengan demikian, gelombang laut beraksi sebagai sebuah gangguan yang terukur (*noise*). Ketika keadaan laut naik, ketinggian gelombang juga akan naik, dan ini akan membuat rudal kesulitan. Untuk wahana seperti ini, mengontrol ketinggian dengan kehadiran gelombang laut sebagai gangguan menjadi sangat penting, terutama ketika gelombang laut cukup besar.

Dasar dari sistem kontrol ketinggian seperti dapat Gambar 2-1.



Gambar 2-1: Sistem kontrol ketinggian

Keterangan

- h = adalah ketinggian yang dicapai,
- h_d = adalah ketinggian yang diinginkan
- \tilde{h} = adalah ketinggian yang terukur
- f_z = adalah percepatan lateral yang dicapai oleh rudal
- v = adalah representasi gangguan yang berupa gelombang laut.

Masalah kontrol ketinggian untuk sebuah rudal atas air umumnya cukup sulit, karena harus memperhitungkan dua syarat yang bertentangan. Di satu sisi, lup kontrol ketinggian yang ditunjukkan pada Gambar 2-1 yang berisi sebuah integrator dobel hanya dapat distabilkan dengan menggunakan sebuah kompensator mendahului (*lead compensator*). Kompensator mendahului ini sudah banyak digunakan dalam desain sistem kontrol rudal untuk tujuan stabilisasi dan meningkatkan tanggapan transient. Tetapi, seperti dinyatakan dalam Garnell, P. [1980], kompensator mendahului dapat menyebabkan servo rudal mengalami saturasi karena adanya pengukuran ketinggian laut seketika dengan gangguan. Karena desain yang ada sebelumnya tidak memperhitungkan isu gangguan (*noise*), maka penting untuk mengembangkan desain yang sudah ada. Dan, pendekatan yang digunakan dalam tulisan ini mampu menyelesaikan konflik dengan menggunakan sebuah filter prediktif untuk menghilangkan gangguan dalam pengukuran ketinggian.

2.2 Autopilot Percepatan Lateral

Autopilot percepatan lateral adalah sistem autopilot untuk mendapatkan percepatan lateral yang diinginkan. Setelah percepatan ini diperoleh, diintegrasikan dua kali untuk mendapatkan ketinggian riil dari rudal.

Untuk autopilot lateral, beberapa hukum kendali sudah disintetisa dan dianalisis selama beberapa tahun, seperti autopilot proporsional, autopilot percepatan lateral, autopilot giro laju, dan autopilot posisi angular. Tetapi, autopilot percepatan lateral sudah digunakan

secara memuaskan pada beberapa rudal. Dalam penelitian ini, digunakan autopilot percepatan lateral di dalam sistem kontrol ketinggian. Konfigurasi dasar autopilot seperti diberikan oleh Garnell, P. [1980], dapat dilihat pada Gambar 2-2.

Servo sayap diasumsikan sebagai sebuah sistem orde dua dengan k_s adalah gain, ω_{ns} adalah frekuensi alami dan μ_s adalah redaman servo. Akselerometer diletakkan di depan, pada jarak c dari pusat gravitasi, yang akan menambah kestabilan autopilot. Akselerometer dengan gain k_a memberikan umpan balik utama, sedangkan giro laju dengan gain k_g memberikan umpan balik laju untuk mencapai redaman yang cukup di dalam sistem lup tertutup.

Fungsi transfer aerodinamik $f_z(s)/\eta(s)$ dan $q(s)/f_z(s)$ dapat diturunkan dari persamaan gerak rudal. Parameter z_ω adalah gaya samping sebagai hasil dari *sideslip* kecepatan/massa, z_q gaya samping sebagai hasil dari laju angguk/massa dan z_η gaya samping sebagai hasil dari defleksi elevator/massa. Sedangkan m_ω adalah momen angguk sebagai hasil dari *sideslip* kecepatan/momen inersia, m_q momen angguk sebagai hasil dari laju angguk/momen

inersia dan m_η adalah momen angguk sebagai hasil dari defleksi elevator/momen inersia. Parameter lain yang ada di dalam fungsi transfer adalah q , *pitch rate*, kemudian U , komponen kecepatan rudal pada sumbu X dan ω komponen kecepatan rudal terhadap sumbu Z , dan η menunjukkan defleksi elevator. Dari Gambar 2-2, diperoleh fungsi alih lup tertutup untuk autopilot dalam bentuk :

$$\frac{f_z(s)}{f_{zd}(s)} = \frac{b_2s^2 + b_1s + b_0}{s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0} \dots\dots\dots (2-1)$$

Jika disubstitusi harga numerik untuk autopilot dari rudal yang dikontrol, akan diperoleh.

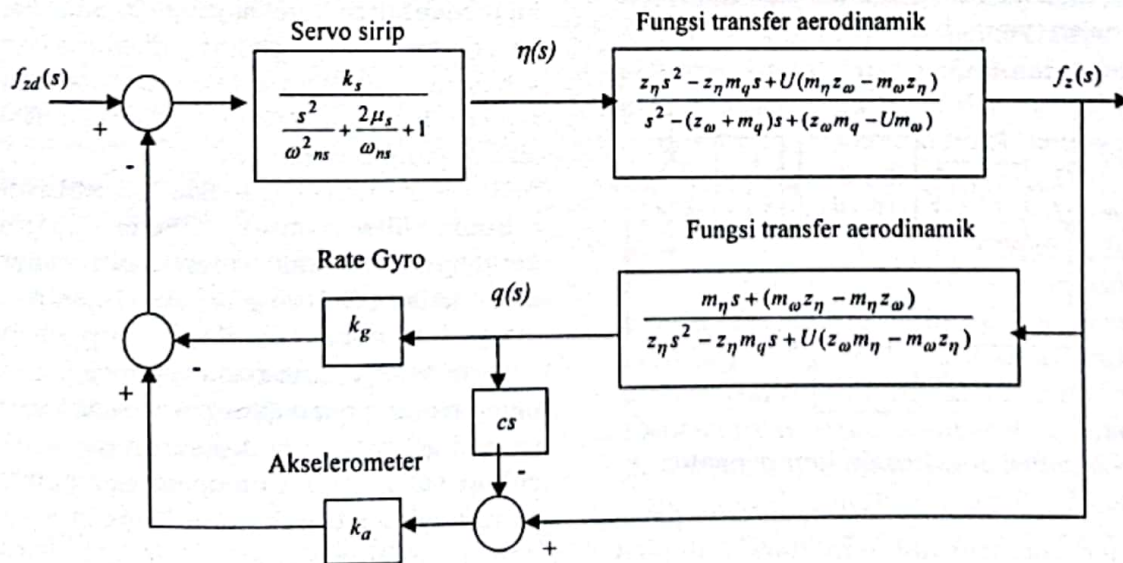
$$U = 500ms^{-1}, z_\omega = -3ms^{-1}, z_\eta = -180ms^{-1}$$

$$m_\omega = -1m^{-1}s^{-1}, m_\eta = -500s^{-2}, m_q = -3s^{-1}$$

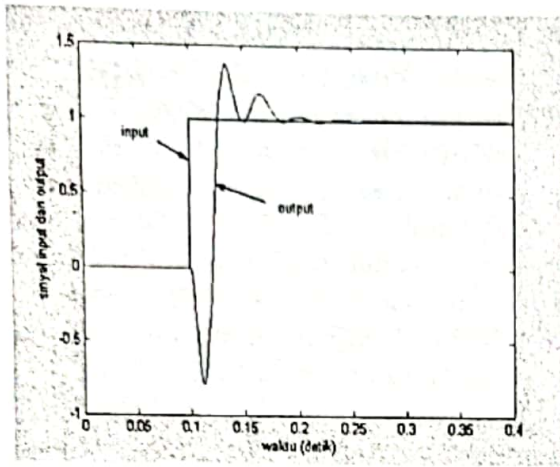
$$k_s = 0.007, \mu_s = 0.5, \omega_{ns} = 180rads^{-1}$$

$$k_g = 30, k_a = 0.8, c = 0.5m$$

Hasil perhitungan seperti pada Gambar 2-3. Perhatikan Gambar 2-3, tanggapan autopilot cukup diredam, dan gain keadaan tunak (*steady-state*)-nya sama dengan satu, dengan waktu tanggap 0.1 detik.



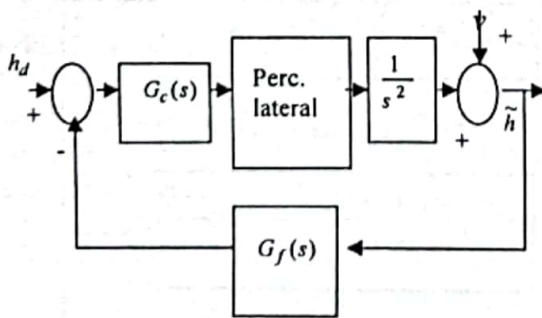
Gambar 2-2: Autopilot percepatan lateral



Gambar 2-3: Tanggapan autopilot percepatan

2.3 Kompensator

Dalam blok diagram sistem kontrol ketinggian (Gambar 2-1), terdapat sebuah integrator doble. Untuk itu, penting sekali didesain sebuah kompensator guna memenuhi stabilitas dan waktu tanggap yang memadai untuk sistem lup tertutup. Di dalam Sutton, R. dan Windley, C. L. [1986] kompensator berupa sebuah kompensator umpan balik proporsional derivative (*Proportional derivative feedback compensator*) dan sebuah kompensator umpan maju (*lead feedforward compensator*). Desain dari kompensator dapat dilihat pada Gambar 2-4, dengan $G_c(s) = K(1+sT_1)/(1+sT_2)$ dan $G_f(s) = (1+s\tau)$. Untuk memenuhi stabilitas dan tanggapan transien yang baik, maka $\tau=1$, $T_1=0.5$, $T_2=0.1$ dan $K=5$.



Gambar 2-4: Desain kompensator

Dengan memanfaatkan data parameter kompensator dan data autopilot yang diberikan sebelumnya, tanggapan sistem kontrol ketinggian cukup memuaskan, tanpa adanya *overshoot* dan dengan

waktu tanggap 4 detik. Dan diagram Bode dari fungsi alih lup terbuka sistem kontrol ketinggian terkompensasi menunjukkan bahwa sistem lup tertutup stabil dengan margin fasa sebesar 56.42 derajat.

3 FILTER PREDIKTIF

Sistem kontrol ketinggian terkompensasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2-4 belum dapat menghilangkan pengaruh gangguan, seperti gelombang laut. Untuk itu diperlukan sebuah filter yang akan menghilangkan pengaruh gangguan gelombang laut secara menyeluruh. Sebuah metode baru tentang filter dan estimasi keadaan untuk sistem non linier dengan kehadiran kesalahan model yang signifikan telah dikembangkan oleh Crassidis dan Markley (1997). Algoritma ini dinamakan *predictive filtering* (filter prediktif), yang didasarkan pada kontrol prediktif domain waktu kontinyu untuk sistem nonlinier yang dibahas oleh Lu (1994). Filter prediktif memberikan beberapa keuntungan dibandingkan dengan teknik estimasi lainnya. Telah dibuktikan bahwa di dalam filter prediktif kesalahan model tidak perlu dinyatakan dalam proses *Gaussian*, tidak seperti algoritma filter yang lain semisal Kalman filter. Algoritma ini menentukan koreksi yang ditambahkan ke dalam model yang diasumsikan, sehingga model dan koreksi menghasilkan representasi yang akurat dari karakteristik sistem yang sebenarnya.

Algoritma digunakan mendesain sebuah filter untuk sistem kontrol ketinggian. Untuk mendesain filter, diasumsikan bahwa *plant* diberikan oleh integrator doble di dalam lup maju seperti ditunjukkan pada Gambar 2-1, di mana v merupakan gangguan (*disturbance*) seperti gelombang laut. Asumsi seperti ini cukup valid karena autopilot mempunyai gain keadaan tunak sama dengan satu, dan mempunyai waktu tanggap lebih kecil dibandingkan dengan sistem lup tertutup. Representasi ruang keadaan untuk integrator doble, adalah

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u, \dots\dots\dots (3-1)$$

$$\tilde{y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + v$$

Keterangan:

- x_1 = adalah ketinggian riil h ,
- x_2 = adalah laju perubahan dari ketinggian riil,
- u = adalah percepatan lateral f_z ,
- v = gangguan yang berupa gelombang laut.

Dinamik estimator diasumsikan berbentuk:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} d, \dots\dots\dots (3-2)$$

$$\hat{y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix}$$

Di sini, $\hat{y} = \hat{x}_1$ adalah ketinggian estimasi, yaitu \hat{h} dan d adalah kesalahan model untuk ditentukan. Dengan mengikuti prosedur algoritma filter prediktif, nilai prediksi output estimasi, adalah

$$\hat{y}(t + \delta) \approx \hat{x}_1 + \delta \dot{\hat{x}}_1 + (\delta^2 / 2)(u + d) \dots\dots\dots (3-3)$$

Dan sebuah pengukuran performansi ditentukan oleh:

$$J(d) = \frac{1}{2} [\tilde{y}^\Delta - \hat{y}(t + \delta)]^2 Q + 1/2 [d^2 R] \dots\dots\dots (3-4)$$

dimana \tilde{y}^Δ adalah harga prediksi dari output yang diukur pada waktu $(t + \delta)$, dan dalam penelitian ini diaproksimasikan sebagai $\tilde{y}^\Delta \approx \tilde{y} + \delta \dot{\tilde{y}}$. Fungsi bobot (*weights*) $Q > 0$ dan $R > 0$ dan $\delta > 0$ ditentukan oleh kita sendiri untuk mendapatkan performansi yang memuaskan dari filternya.

Dengan mengaplikasikan kondisi perlu (*necessary condition*) untuk minimisasi J , terhadap d , yaitu

$$\partial J / \partial d = 0,$$

sebuah solusi *closed-form* untuk kesalahan model $d(t)$ didapatkan :

$$d = -\frac{2\delta^2 Q}{d^4 Q + 4R} (\hat{x}_1 + \delta \dot{\hat{x}}_1 + \frac{\delta^2}{2} u - \tilde{y}^\Delta) \dots\dots\dots (3-5)$$

Dengan memasukan persamaan 3-5 ke dalam persamaan 3-2, diperoleh estimasi keadaan, yang berarti mendapatkan estimasi ketinggian \hat{x}_1 , yaitu ketinggian estimasi \hat{h} rudal di atas permukaan laut.

Dengan filter ini dilakukan analisis kestabilan dari sistem kontrol ketinggian secara keseluruhan. Akhirnya diperoleh persamaan

$$\hat{h}(s) = \left[\frac{\hat{h}(s)}{f_z(s)} \right] f_z(s) + \left[\frac{\hat{h}(s)}{v(s)} \right] v(s) \dots\dots\dots (3-6)$$

dengan

$$\frac{\hat{h}(s)}{f_z(s)} = \frac{(1 - 0.5\delta^2 \Delta)s^2 + \Delta\delta s + \Delta}{s^2(s^2 + \Delta\delta s + \Delta)} \dots\dots\dots (3-7)$$

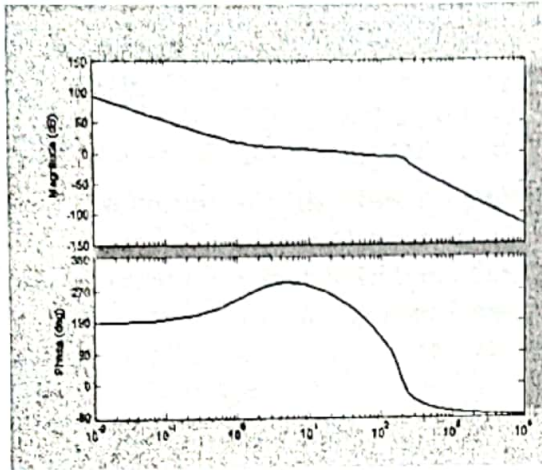
dan

$$\frac{\hat{h}(s)}{v(s)} = \frac{\Delta(1 + \delta s)}{s^2 + \Delta\delta s + \Delta} \dots\dots\dots (3-8)$$

dengan $\Delta \cong 2\delta^2 Q / (d^4 Q + 4R)$

Kemudian diganti integrator dobel di dalam sistem kontrol ketinggian yang terkompensasi dengan fungsi transfer $\hat{h}(s) / f_z(s)$, untuk mendapatkan sistem kontrol dengan filter.

Untuk mendapatkan parameter filter, sebuah simulasi dilakukan, dan telah diamati bahwa $\delta = 0.05$, $R = 10$ dan $Q = 1$ memberikan performansi yang memuaskan kepada filter. Dan dengan harga ini, analisis kestabilan dilakukan dengan membuat diagram Bode dari fungsi alih lup terbuka sistem kontrol ketinggian terkompensasi berikut filter. Diagram seperti pada Gambar 3-1. Dari gambar tersebut, margin fasa yang terukur adalah 57.69 derajat, hal ini menunjukkan bahwa sistem lup tertutup dari sistem kontrol ketinggian rudal atas air cukup stabil. Hal ini ditunjukkan pula oleh hasil simulasi pada Gambar 4-2. Dengan demikian, dapat dikatakan, bahwa penggunaan sebuah filter prediktif tidak mempengaruhi kestabilan sistem awal. Kestabilan masih tetap dapat dipertahankan dengan kehadiran sebuah filter prediktif.



Gambar 3-1: Diagram Bode fungsi alih sistem kontrol ketinggian dengan filter

4 HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

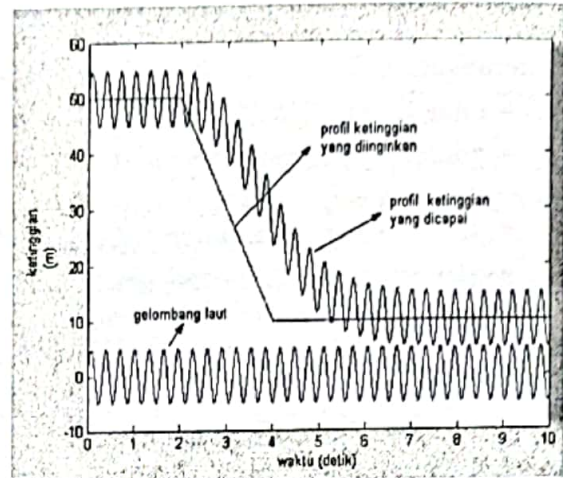
Sebelum dilakukan simulasi, terlebih dahulu diperlukan sebuah model untuk gangguan gelombang laut. Akurasi dari pemodelan gangguan gelombang laut ini merupakan area riset tersendiri. Dalam penelitian ini diasumsikan bahwa model gelombang laut adalah sebuah sinusoidal dengan amplitude 5 m dan frekuensi 5 Hz. Di dalam simulasi ini, profil ketinggian referensi yang akan diikuti rudal, adalah

$$\begin{aligned} t < 2s, & \quad h_d = 50 \text{ m} \\ 2 < t < 4s, & \quad h_d = 50 - 20 \cdot (t - 2) \\ 4 < t < 30s, & \quad h_d = 10 \text{ m} \end{aligned}$$

Dan juga diasumsikan bahwa rudal mempunyai ketinggian awal 50 m. Dikarenakan variasi ketinggian dari rudal cukup kecil, hanya dari 10 m sampai 50 m, sehingga variasi data aerodinamik diabaikan. Simulasi dilakukan dengan memasukkan parameter-parameter, baik parameter model dari rudal itu sendiri, maupun parameter kontroler dan filter.

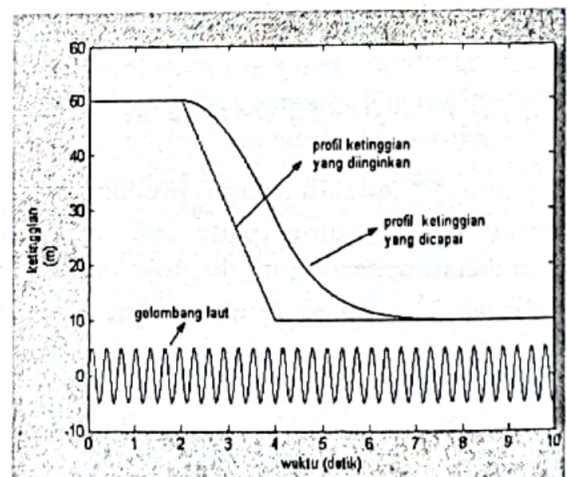
Pertama, simulasi dilakukan untuk sistem kontrol ketinggian dengan kompensator dan kehadiran gelombang laut tanpa filter prediktif. Hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 4-1. Dari gambar tersebut dapat diamati bahwa sistem kontrol ketinggian dengan kompensator tanpa filter prediktif, performansinya sangat tidak memuaskan.

Rudal harus mengikuti trayektori ketinggian sejajar terhadap gelombang laut. Dan kondisi ini sangat menyulitkan untuk rudal atas air.



Gambar 4-1: Profil ketinggian rudal tanpa filter

Kemudian disimulasikan sistem kontrol ketinggian dengan filter prediktif. Dan hasil simulasinya dapat dilihat pada Gambar 4-2. Dari gambar ini dapat dikatakan bahwa profil ketinggian yang diinginkan dapat dijelajahi dengan cukup sempurna, meskipun dengan gangguan gelombang laut.



Gambar 4-2: Profil ketinggian rudal dengan filter prediktif

5 KESIMPULAN

Sebuah sistem kontrol ketinggian untuk rudal atas air telah didesain, dan telah dibuktikan pula bahwa efek dari gelombang laut dapat dikurangi secara

signifikan dengan menggunakan sebuah filter prediktif. Sistem lup tertutup dengan filter prediktif ini tetap stabil. Hasil simulasi menunjukkan bahwa performansi sistem kontrol ketinggian dengan menggunakan filter prediktif dapat memenuhi obyektivitas dari rudal atas air secara memadai.

6 DAFTAR RUJUKAN

- Aerospace Blocksheet For Use with Simulink*, User's Guide, The Math Works, Inc.
- Benjamin, C. Kuo, 1990. *Automatic Control Systems*, 4th Edition, Prentice Hall.
- Crassidis, J.L., dan Markley, F.L., 1997. *Predictive Filtering for Nonlinear Systems*, Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 20, No. 3, hal. 566 – 572.
- Garnell, P., 1980. *Guided Weapon Control Systems*, 2nd ed, Pergamon, Oxfors.
- Hensch, M. J. dan Jack N. Nielsen, 1986. *Tactical Missile Aerodynamics*, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol 104.
- Lu, P., 1994. *Nonlinear Predictive Controllers for Continous Systems*, Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 17, No. 3, hal. 553 – 560.
- MATLAB, The Language of Technical Computing*, Using MATLAB, The MathWorks, Inc.
- Sutton, R., dan Windley, C. L., 1986. *Stabilization and Simulation of the Height Control System of a sea Skimming Missile*, Journal of Naval Sciences, Vol. 11, No. 4, pp. 248-256.