

DESAIN SENSOR KECEPATAN BERBASIS DIODE MENGGUNAKAN FILTER KALMAN UNTUK ESTIMASI KECEPATAN DAN POSISI KAPAL

Alrijadjis¹, Bambang Siswanto¹

¹ Program Pascasarjana, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Email : alrijadjis@eepis-its.edu; bamsis@elect-eng.its.ac.edu

Abstrak

Makalah ini membahas design sensor kecepatan dengan menggunakan diode 1N4001 untuk mengestimasi kecepatan dan posisi kapal. Rangkaian seri dua diode dipanaskan oleh heater dan kecepatan angin akan mendinginkan diode. Perubahan karakteristik tegangan diode terhadap suhu akan dimanfaatkan sebagai sensor kecepatan. Output sensor selanjutnya akan diperbaiki linearitasnya dengan analog signal processing circuit. Untuk mengatasi noise yang timbul dalam proses pengukuran dan meningkatkan kehandalan sensor serta untuk mengestimasi kecepatan dan posisi kapal digunakan filter Kalman. Hasilnya menunjukkan bahwa filter Kalman dapat mengestimasi kecepatan dan posisi kapal dengan cukup akurat. Karena menggunakan diode standar 1N4001 (bukan diode thermal), maka kemampuan sensor hanya sampai kecepatan 10 m/s atau 36 km/jam.

Kata kunci : diode, sensor kecepatan, karakteristik tegangan diode, analog signal processing circuit, noise, filter Kalman

1. Pendahuluan

Sensor kecepatan dengan menggunakan diode merupakan salah satu pengembangan yang relatif baru dari aplikasi diode yang diharapkan dapat menjadi alternatif teknologi sensor yang handal, akurat, tetapi relatif ekonomis dan sederhana

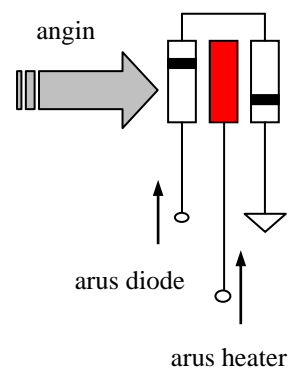
Umumnya diode dipakai sebagai rangkaian penyearah. Dengan memanfaatkan perubahan karakteristik tegangan diode terhadap suhu, diode dapat dipakai sebagai sensor suhu maupun sensor kecepatan angin. Rangkaian diode dipanaskan oleh heater, kemudian kecepatan angin akan mendinginkan diode, sehingga terjadi keterkaitan antara kecepatan angin dan tegangan diode. Konsep inilah yang dipakai sebagai sensor kecepatan angin [1].

Penelitian ini akan mengembangkan sensor kecepatan yang dipasang pada kapal untuk mengestimasi kecepatan dan posisi kapal menggunakan filter Kalman. Pemakaian filter Kalman dikarenakan output sensor kecepatan banyak terdapat noise yang berasal dari getaran mesin kapal, gerakan ombak, noise EM eksternal/internal, noise sensor, noise selama proses pengukuran dan lain-lain.

2. Rancangan sensor

Sensor kecepatan ini menggunakan dua diode 1N4001 yang disusun seri dan dilekatkan dengan sebuah heater yang berupa resistor berdaya 1 watt, seperti ditunjukkan pada gambar 2.1. Arus heater dijaga konstan agar diperoleh suhu yang konstan pada 150°C. Suhu ini akan memanaskan diode sehingga tegangan forward diode menjadi lebih kecil dari tegangan forward pada suhu kamar.

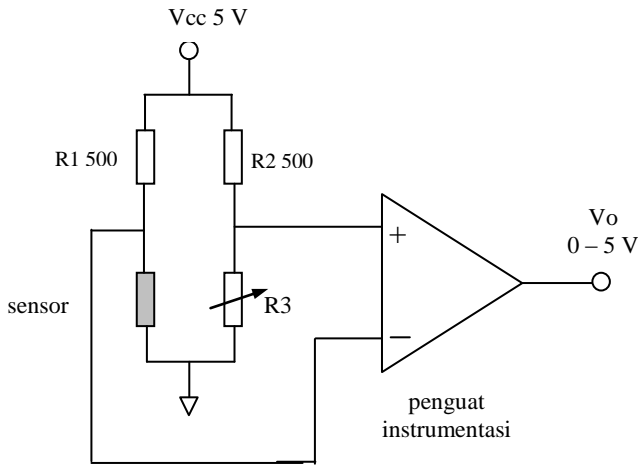
Angin yang disebabkan gerak maju kapal dengan kecepatan tertentu akan menyebabkan suhu diode turun, sehingga tegangan forward diode akan naik. Dengan konsep ini diperoleh keterkaitan antara kecepatan kapal dan tegangan forward diode.



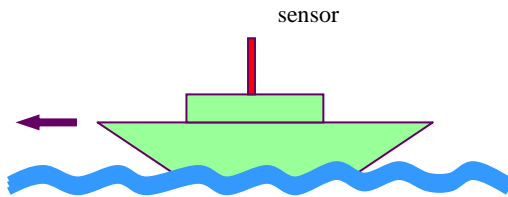
Gambar 2.1 Diode sebagai sensor kecepatan

Rangkaian signal conditioning dengan jembatan DC dan penguat instrumentasi digunakan untuk mengolah tegangan keluaran sensor seperti ditunjukkan pada gambar 2.2. Tegangan output rangkaian ini diseting pada range 0 – 5 volt sehingga dapat langsung diolah oleh ADC atau mikrokontroler.

Gambar 2.3 menunjukkan penempatan sensor kecepatan pada kapal. Sensor ditempatkan pada bagian terbuka sehingga dapat langsung berhubungan dengan udara sekitar.



Gambar 2.2 Rangkaian signal conditioning



Gambar 2.3 Penempatan sensor di kapal

3. Rangkaian linearisasi

Pengujian untuk rangkaian sensor dengan *signal conditioning* ditunjukkan pada gambar 3.1. Nampak bahwa sensor hanya mampu mengukur kecepatan maksimum 10 m/s atau 36 km/jam. Setelah kecepatan melampaui 3 m/s keluaran sensor menjadi tidak linear. Karena itu perlu ditambahkan rangkaian linearisasi untuk memperbaiki dan meningkatkan linearitasnya.

Gambar 3.2 menunjukkan rangkaian linearisasi dengan menggunakan IC LM 35 sebagai sensor suhu diode. IC ini memiliki linearitas yang sangat baik dengan tingkat sensitifitas 10 mV/°C. Seperti ditunjukkan tabel 3.1, dapat dibuat persamaan tegangan keluaran LM 35 terhadap kecepatan angin, yaitu :

$$v_o(s) = -\frac{1,2}{10} \cdot s + 1,5 \quad [\text{volt}] \quad (3.1)$$

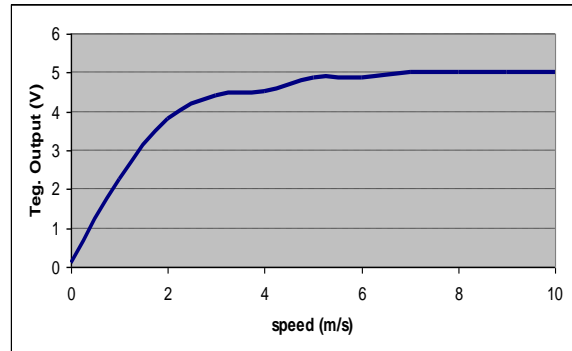
dimana : s = kecepatan [m/s]

Kemudian, diharapkan tegangan keluaran ini bergradien positif dan berada pada range 0 – 5 volt, sehingga diperlukan penguat *inverting* dengan nilai *gain* 4 dan rangkaian penjumlahan dengan v_{ref} 6 volt. Dengan demikian tegangan keluaran LM 35 sekarang menjadi :

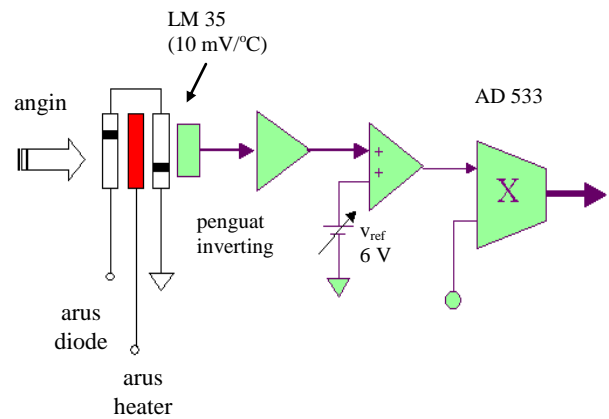
$$v'_o(s) = \frac{4,8}{10} \cdot s \quad [\text{volt}] \quad (3.2)$$

Tegangan keluaran pada persamaan (3.2) selanjutnya dikalikan dengan tegangan keluaran

sensor diode dengan rangkaian pengali AD 533, sehingga menghasilkan tegangan keluaran yang lebih baik linearitasnya, seperti ditunjukkan pada gambar 3.3.



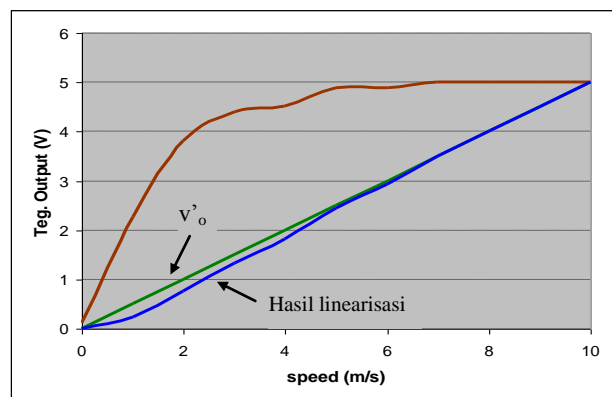
Gambar 3.1 Keluaran sensor diode



Gambar 3.2 Rangkaian linearisasi

Tabel 3.1 Keluaran LM 35 dan Linearisasi

Suhu (C)	Vo IC LM35 (V)	Kriteria	Speed (m/s)	Vo x Gain+6
30	0.3	High Speed (10 m/s)	10	4.8
150	1.5	Low Speed (0 m/s)	0	0



Gambar 3.3 Tegangan keluaran setelah linearisasi

4. Pemodelan Filter Kalman

Persamaan *state* untuk filter Kalman dinyatakan sebagai berikut :

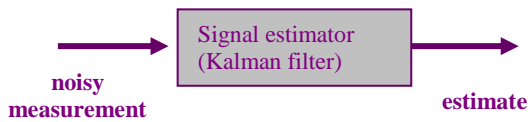
$$x_{k+1} = \mathbf{A}x_k + \mathbf{B}u_k + w_k \quad (4.1)$$

$$y_k = \mathbf{C}x_k + z_k \quad (4.2)$$

dimana :

- $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$: matriks sistem, *input* dan *output*
- x : *state* sistem
- u : *input* yang diketahui/diberikan
- y : *output* dari pengukuran
- w : *noise* proses
- z : *noise* pengukuran
- k : indeks waktu

Filter Kalman digunakan untuk mengestimasi sinyal atau *state* sistem yang diperoleh dari suatu pengukuran yang mengandung *noise*, seperti ditunjukkan pada gambar 4.1. *State* sistem x tidak bisa diukur secara langsung, sehingga dari pengukuran y dapat dilakukan estimasi untuk *state* sistem x . Nilai y yang terukur mengandung *noise*, sehingga perlu diestimasi nilai sebenarnya menggunakan filter Kalman.



Gambar 4.1 Filter Kalman

Persamaan kinematika gerak lurus waktu kontinyu dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$p(t) = p_o + v_o t + \frac{1}{2} \cdot a t^2 \quad (4.3)$$

$$v(t) = v_o + a t \quad (4.4)$$

dimana :

- $p(t)$: posisi setiap saat
- p_o : posisi awal
- v_o : kecepatan awal
- a : percepatan
- $v(t)$: kecepatan setiap saat

Persamaan (4.3) dan (4.4) akan diubah dalam sistem diskrit dengan periode *sampling* T sebagai berikut :

$$p_{k+1} = p_k + T \cdot v_k + \frac{1}{2} \cdot T^2 \cdot u_k + \hat{p}_k \quad (4.5)$$

$$v_{k+1} = v_k + T \cdot u_k + \hat{v}_k \quad (4.6)$$

dimana :

- T : periode *sampling*
- u_k : *input* percepatan
- \hat{p}_k : *noise/error* posisi
- \hat{v}_k : *noise/error* kecepatan

Selanjutnya dari persamaan (4.5) dan (4.6) dapat dibuat persamaan model *state* sistem sebagai berikut :

$$x_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot x_k + \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cdot T^2 \\ T \end{bmatrix} \cdot u_k + w_k \quad (4.7)$$

$$y_k = [0 \quad 1] \cdot x_k + z_k \quad (4.8)$$

dimana:

$$x_k = \begin{bmatrix} p_k \\ v_k \end{bmatrix} : \text{vektor } \textit{state}/\textit{variabel } \textit{state}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} : \text{matriks sistem}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cdot T^2 \\ T \end{bmatrix} = \mathbf{B} : \text{matriks } \textit{input}$$

$$[0 \quad 1] = \mathbf{C} : \text{matriks } \textit{output}$$

Algoritma filter Kalman pada dasarnya akan menghitung besarnya *gain* Kalman, mengestimasi variabel *state* dan mengestimasi *error covariance* setiap indeks waktu, seperti ditunjukkan persamaan di bawah ini :

$$K_k = \mathbf{A}P_k \mathbf{C}^T (\mathbf{C}P_k \mathbf{C}^T + S_z)^{-1}$$

$$\hat{x}_{k+1} = \left(\mathbf{A} \hat{x}_k + \mathbf{B} u_k \right) + K_k \left(y_{k+1} - \mathbf{C} \hat{x}_k \right)$$

$$P_{k+1} = \mathbf{A}P_k \mathbf{A}^T + S_w - \mathbf{A}P_k \mathbf{C}^T S_z^{-1} \mathbf{C}P_k \mathbf{A}^T \quad (4.9)$$

dimana :

- K : *Gain* Kalman
- \hat{x} : estimasi variabel *state* x
- P : estimasi *error covariance*
- $S_z = E(z_k \cdot z_k^T)$: matriks *noise covariance*
- $S_w = E(w_k \cdot w_k^T)$: matriks *noise covariance*

5. Simulasi

Bahasa pemrograman yang dipakai dalam simulasi ini adalah Matlab 6.5. Untuk simulasi digunakan periode *sampling* $T = 0,1$ detik atau data kecepatan diukur/diambil 10 kali tiap detik. Dengan demikian persamaan (4.7) akan menjadi :

$$x_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0,1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot x_k + \begin{bmatrix} 0,005 \\ 0,1 \end{bmatrix} \cdot u_k + w_k$$

Selanjutnya data-data simulasi diberikan sebagai berikut:

- a. *Input* percepatan konstan $u = 2 \text{ m/s}^2$
- b. *Noise*/toleransi pengukuran kecepatan oleh sensor $z = 1 \text{ m/s}$
- c. *Noise*/toleransi input percepatan $w = 0,2 \text{ m/s}^2$

Matriks *noise covariance* dari pengukuran (S_z) ditentukan sebagai berikut :

- a. $z_k = 1$, maka $z_k^T = 1$.
- b. $S_z = E(z_k \cdot z_k^T) = 1 \times 1 = 1$.

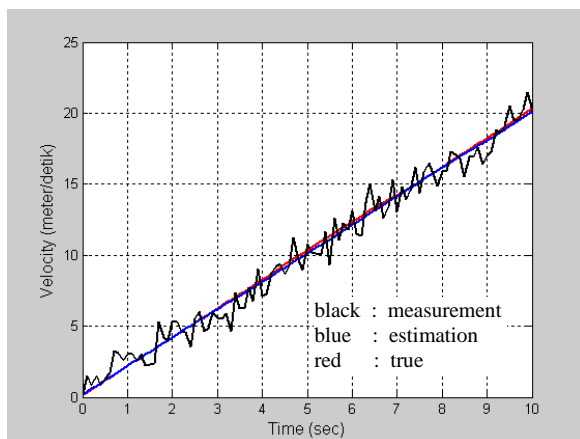
Matriks *noise covariance* dari proses (S_w) ditentukan sebagai berikut :

- Noise/toleransi input percepatan $\sigma = 0,2$.
- Posisi $p \propto 0,5.T^2$.percepatan, maka *variance noise* posisi $p^2 = (0,5.T^2)^2$. $\sigma^2 = (0,005)^2.(0,2)^2 = 1 \times 10^{-6}$.
- Kecepatan $v \propto T$.percepatan, maka *variance noise* kecepatan $v^2 = T^2$. $\sigma^2 = (0,1)^2.(0,2)^2 = 4 \times 10^{-4}$.
- Kombinasi *noise* posisi dan kecepatan = $p.v = (0,005.0,2).(0,1.0,2) = 2 \times 10^{-5}$.
- $S_w = E(w_k.w_k^T) = E(x.x^T)$

$$= E\left(\begin{bmatrix} p \\ v \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p & v \end{bmatrix}\right) = E\left(\begin{matrix} p^2 & pv \\ vp & v^2 \end{matrix}\right)$$

$$= \begin{pmatrix} 1 \times 10^{-6} & 2 \times 10^{-5} \\ 2 \times 10^{-5} & 4 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

Gambar 5.1 menunjukkan hasil simulasi, dimana ditampilkan perbandingan antara kecepatan dari pengukuran (garis hitam), kecepatan dari estimasi filter Kalman (garis biru) dan kecepatan sesungguhnya (garis merah). Nampak bahwa hasil estimasi kecepatan dengan filter Kalman mendekati kecepatan sesungguhnya.

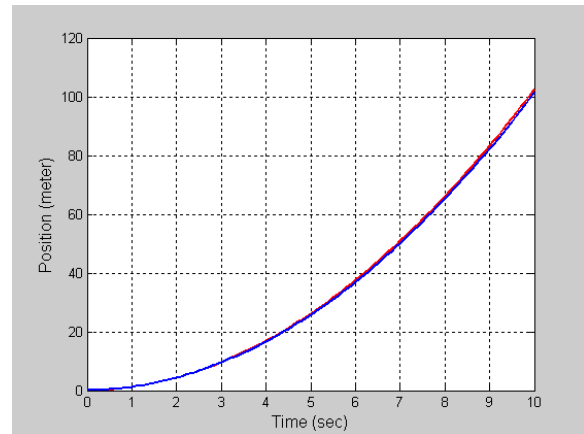


Gambar 5.1 Hasil simulasi untuk kecepatan

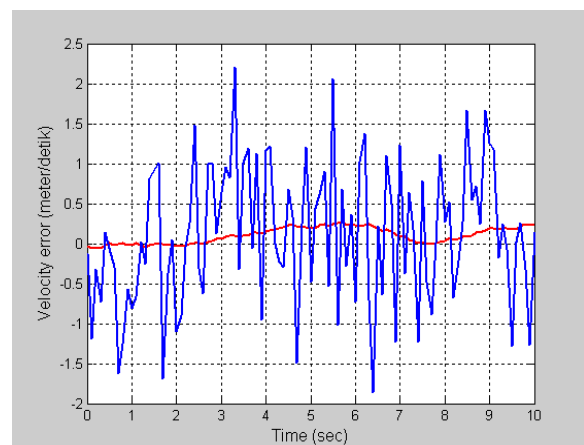
Gambar 5.2 menunjukkan perbandingan posisi estimasi dan posisi sebenarnya. Nampak bahwa hasil estimasi mendekati posisi sebenarnya.

Error pengukuran kecepatan dan *error* estimasi kecepatan ditunjukkan pada gambar 5.3. Nampak bahwa *error* estimasi kecepatan dengan filter Kalman kurang dari 0,5 m/s, dimana jauh lebih kecil dari *error* pengukuran kecepatan yang dapat mencapai lebih dari 2 m/s.

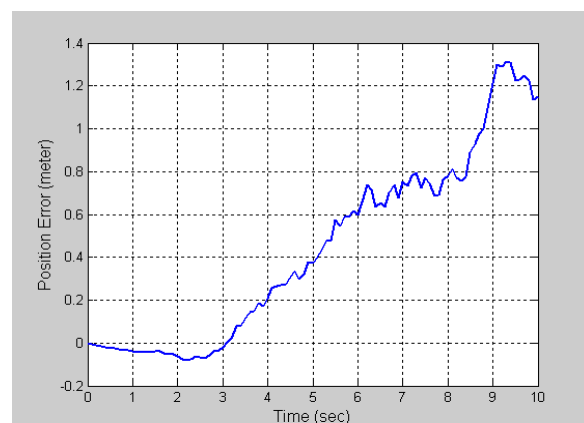
Error estimasi posisi ditunjukkan pada gambar 5.4. Nampak bahwa *error* estimasi posisi terbesar adalah sekitar 1,3 meter pada detik ke-9 atau sekitar 1,6%.



Gambar 5.2 Estimasi posisi



Gambar 5.3 Error pengukuran dan estimasi kecepatan



Gambar 5.4 Error estimasi posisi

6. Kesimpulan

Dari hasil eksperimen dan simulasi dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Diode dapat dipakai sebagai sensor kecepatan kapal yang handal, *compact*, ekonomis dan sederhana.
2. Untuk meningkatkan kemampuan batas ukur dapat dipakai jenis diode *thermal* atau dengan metode diode *array*.
3. Toleransi sensor kecepatan dapat diatasi dengan mengolah data menggunakan filter Kalman.
4. Filter Kalman dapat mengestimasi dengan tingkat keakuratan yang handal pada suatu pengukuran yang penuh dengan noise.

DAFTAR PUSTAKA

1. Arif Harianto, "Aplikasi Diode Sebagai Sensor Pada Alat Ukur Kecepatan Angin Tipe *Thermal*", Tugas Akhir Jurusan Elektronika, PENS-ITS, 2005
2. Yoshihito Shimada, "Design of Air Flowmeter Using *Thermal Diode*", Transistor Technique Magazine, May 2003
3. R.G Brown, P.Y.C Hwang, "Introduction to *Random Signal and Applied Kalman Filtering*", John Wiley & Sons, 1997