

Implementasi Pengendali Logika Fuzzy dengan Tapis Kalman pada Kendali Kecepatan Motor Pneumatik

Budi Setiadi[#], Sudrajat, Endang Habinuddin, Siswoyo

Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung
Jl. Gegerkalong Hilir Ds. Ciwaruga, Kab. Bandung Barat, Indonesia
[#]budi.setiadi@polban.ac.id

Abstrak

Motor pneumatik bekerja dengan cara mengubah energi tekanan udara menjadi putaran mekanik. Sistem kendali kecepatan motor pneumatik diperlukan agar motor dapat berputar sesuai dengan nilai yang diinginkan. Namun, pada penerapannya seringkali hasil pengukuran pada umpan balik oleh sensor mengandung derau yang menyebabkan menurunnya kinerja pengendalian. Penelitian ini mengimplementasikan kendali kecepatan motor pneumatik menggunakan logika fuzzy dengan menambahkan tapis Kalman. Logika fuzzy dirancang dengan masukan galat dan perubahannya, sedangkan keluaran berupa nilai bukaan katup. Tapis Kalman dirancang untuk meminimalkan derau pengukuran sensor dengan mengatur konstanta kovarian derau proses (Q). Hasil pengujian menunjukkan bahwa pengendali mampu menghasilkan respon kecepatan dengan *rise time* dan *settling time* kurang dari 5 detik, tanpa *overshoot*, *error steady-state* kurang dari 2 detik, dan waktu pemulihan kurang dari 6 detik ketika diberi gangguan.

Kata kunci: motor pneumatik, logika fuzzy, tapis Kalman, kendali kecepatan

Abstract

Pneumatic motors work by converting air pressure energy into mechanical rotation. Pneumatic motor speed control system is needed so that the motor can rotate according to the desired value. However, in its application, the measurement results on feedback by the sensor often contain noise which causes a decrease in control performance. This research implements pneumatic motor speed control using fuzzy logic by adding a Kalman filter. Fuzzy logic is designed with the input error and its changes, while the output is the value of the valve opening. The Kalman filter is designed to minimize sensor measurement noise by adjusting the process noise covariance constant (Q). The test results show that the controller can produce a speed response with a rise time and settling time of less than 5 seconds, without overshoot, a steady-state error of less than 2 seconds, and a recovery time of less than 6 seconds when disturbed.

Keywords: pneumatic motor, fuzzy logic, Kalman filter, speed control

I. PENDAHULUAN

Sistem kendali lingkaran tertutup pada umumnya bergantung dari sinyal umpan balik untuk mengendalikan *plant* [1]. Komponen yang biasa digunakan untuk menangkap sinyal umpan balik biasa disebut sensor. Akan tetapi, pada penerapannya hasil pengukuran oleh sensor seringkali terjadi simpangan. Salah satu bentuk simpangan berupa adanya derau dari sinyal listrik yang dihasilkan. Simpangan sinyal umpan balik akan berpengaruh pada variabel yang akan dikendalikan dan tidak akan tercapainya *setpoint*

atau nilai yang ingin dicapai pada suatu sistem kendali. Salah satu solusi untuk mengatasi simpangan umpan balik adalah dengan menerapkan mekanisme tapis Kalman [2].

Banyak penelitian yang menerapkan tapis Kalman sebagai metode prediksi untuk meningkatkan keakuratan pembacaan sensor diantaranya *monocular camera* untuk tanda pendeteksi bahaya di sistem asisten pengemudi [3]. Didapatkan hasil *monocular camera* yang dapat mendeteksi jarak kendaraan dengan stabil dan konsisten. Kemudian terdapat penerapan metode tapis Kalman yang digunakan untuk mengobservasi

kesehatan [4]. Selanjutnya terdapat penelitian untuk pelacakan posisi pada ruangan tertutup menggunakan sensor di *smarthphone* [5]. Didapatkan hasil bahwa estimasi pengukuran *Unscented Kalman Filter* (UKF) adalah yang paling baik. Kemudian terdapat penelitian model prediksi banjir menggunakan tapis Kalman [6]. Perbandingan model sistem yang menggunakan tapis Kalman dan tidak menggunakan tapis Kalman, didapatkan hasil yang lebih baik adalah yang menggunakan tapis Kalman. Kemudian tapis Kalman juga dikembangkan menjadi *Cubature Extended Kalman Filter* (C-EKF) untuk penentuan titik koordinat [7], [8]. Penggunaan tapis Kalman terlihat memperkecil kesalahan penentuan lokasi koordinat rata-rata sebesar 18% untuk celah GPS setiap per satu detik. Kemudian tapis Kalman dikembangkan di *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) untuk navigasi otomatis berbasis GPS [9]. Perbandingan penggunaan di sistem UAV pada saat menggunakan algoritma tapis Kalman dapat meningkatkan akurasi jarak sebesar 0,8m dibandingkan terhadap penggunaan algoritma metode Wavelet. Selanjutnya, penelitian implementasi dan pengujian dari kendali *Permanent Magnet Synchronous Speed Motor* (PMSM) yang memiliki kecepatan sangat tinggi [10]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tapis Kalman dapat digunakan untuk penggerak berkecepatan sangat tinggi tanpa kehilangan akurasi dan ketangguhan. Kemudian, terdapat penelitian yang menggunakan tapis Kalman untuk meningkatkan akurasi dari monitoring kualitas udara [11]. Didapatkan hasil dari penelitian, tapis Kalman mampu meningkatkan 27% akurasi pembacaan sensor. Terakhir terdapat penggunaan tapis Kalman pada sensor Lidar dan *Inertial Measurement Unit* (IMU) untuk sistem *Unmanned Aerial Systems* (UAS) [12]. Hasil penelitian menunjukkan dengan tapis Kalman, UAS dapat digunakan untuk pelacakan posisi dan pemetaan dengan akurat.

Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan tapis Kalman pada kendali kecepatan motor pneumatik. Pengendali utama yang digunakan adalah logika *fuzzy*, dimana merupakan lanjutan dari pengendali kecepatan motor *vane* pneumatik [13], [14]. Kendali logika *fuzzy* dirancang karena kemudahan dalam hal implementasi dan tidak memerlukan model matematis dari *plant* yang akan dikendalikan. Perbedaan dari penelitian ini adalah peningkatan pembacaan sensor dengan menggunakan tapis Kalman agar pembacaan kecepatan menjadi lebih akurat.

II. METODE PENELITIAN

A. Tapis Kalman

Metode tapis Kalman bekerja berdasarkan penyaringan yang bersifat rekursif dengan target untuk meminimalisir sinyal gangguan dari pembacaan data yang diperoleh berdasarkan estimasi satu waktu sebelumnya dan data pengukuran saat ini [15]. Bentuk model matematika tapis Kalman dideskripsikan sebagai estimasi varian minimum linier dengan urutan keadaan sistem dinamis [16]. Pada sistem yang dinamis, tapis Kalman direpresentasikan sebagai persamaan keadaan dan persamaan pengamatan, seperti ditunjukkan pada persamaan (1) dan persamaan (2).

Persamaan keadaan:

$$x(k) = Ax(k-1) + u(k) \quad (1)$$

Persamaan pengamatan:

$$z(k) = Hx(k) + v(k) \quad (2)$$

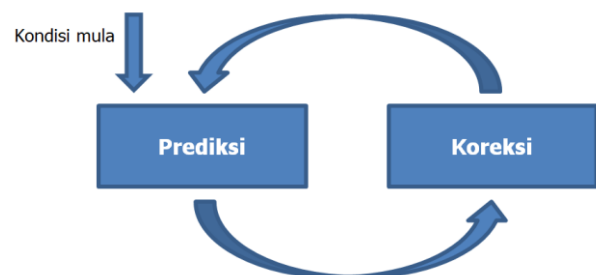
A menunjukkan matriks transfer keadaan sistem, H menunjukkan pengamatan matrik, $u(k)$ $v(k)$ menunjukkan derau Gaussian rata-rata nol dengan kovarian Q dan kovarian R, $v(k) \sim N(0, Q)$, $u(k) \sim N(0, Q)$.

Tahapan umum secara proses pada tapis Kalman terdiri dari dua, yaitu proses prediksi dan koreksi seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Tahap pertama, proses prediksi dilakukan terhadap persamaan keadaan sebagai berikut:

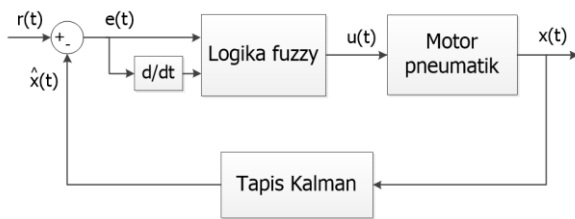
$$\hat{x}(k)^- = A\hat{x}(k-1) + u(k-1) \quad (3)$$

$$P(k)^- = AP(k-1)A^T + Q \quad (4)$$

dimana $\hat{x}(k)^-$ menunjukkan keadaan terprediksi dari nilai keadaan $\hat{x}(k)$, $P(k)^-$ menunjukkan matriks kovarian dari galat nilai keadaan, dan Q menunjukkan matriks kovarian derau proses.



Gambar 1. Tahapan proses tapis Kalman



Gambar 2. Perancangan pengendali yang diusulkan

Setelah tahap prediksi dilalui, selanjutnya dilakukan tahap kedua yang merupakan proses koreksi dengan persamaan sebagai berikut:

$$K(k) = P(k)^{-1} H^T (H P(k)^{-1} H^T + R)^{-1} \quad (5)$$

$$\hat{x}(k) = \hat{x}(k)^- + K(k)(z(k) - H\hat{x}(k)^-) \quad (6)$$

$$P(k) = (I - K(k)H)P(k)^- \quad (7)$$

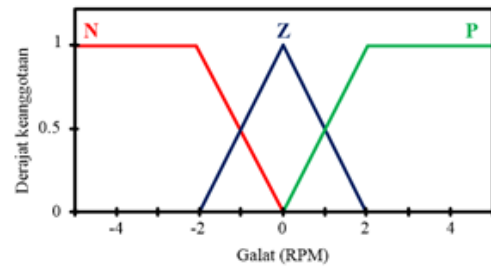
dimana $K(k)$ menunjukkan penguatan Kalman dan R menunjukkan matriks kovarian derau pengukuran. Setelah didapat nilai $K(k)$ maka nilai keadaan $\hat{x}(k)$ dan galat $P(k)$ dikoreksi menjadi nilai yang terestimasi.

B. Perancangan Pengendali Kecepatan

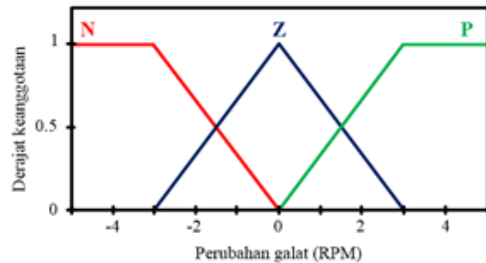
Pada penelitian ini, pengendali yang digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor pneumatik adalah logika fuzzy. Secara umum diagram jerat tertutup sistem kendali dengan menambahkan tapis kalman disisi umpan balik, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

Pengendali logika fuzzy dirancang dengan masukan nilai galat $e(t)$ dan perubahannya $de(t)/dt$. Merujuk pada penelitian sebelumnya [13], [14], fungsi keanggotaan kedua masukan dirancang menggunakan tiga himpunan yaitu negatif (N), zero (Z), dan positif (P), seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

Keluaran dari pengendali yang dirancang berupa persentase bukaan katup pneumatik yang mempengaruhi kecepatan putaran motor. Pengendali logika fuzzy dirancang menggunakan metode Sugeno, sehingga pada bagian keluaran terdapat lima himpunan tegas yaitu sangat kecil (SK), Kecil (K), normal (N), besar (B), dan sangat besar (SB) dengan nilai setiap himpunan seperti ditunjukkan pada Gambar 4.

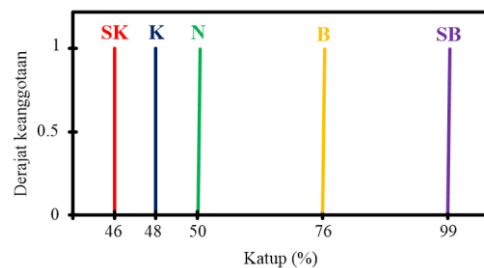


(a)



(b)

Gambar 3. Fungsi keanggotaan masukan: (a) galat, (b) perubahan galat

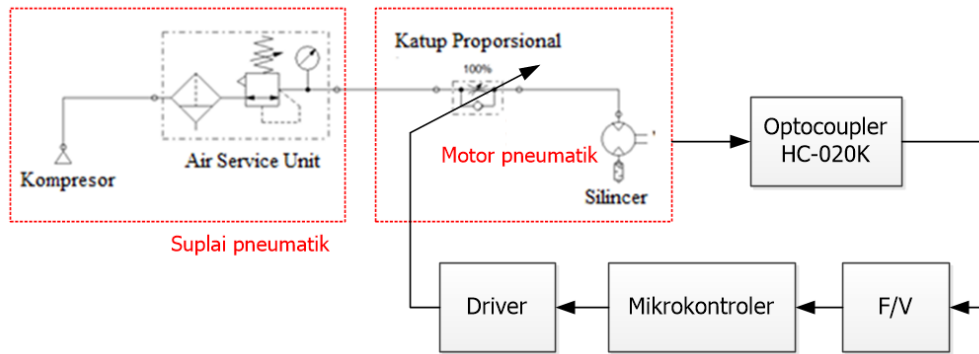


Gambar 4. Fungsi keanggotaan keluaran

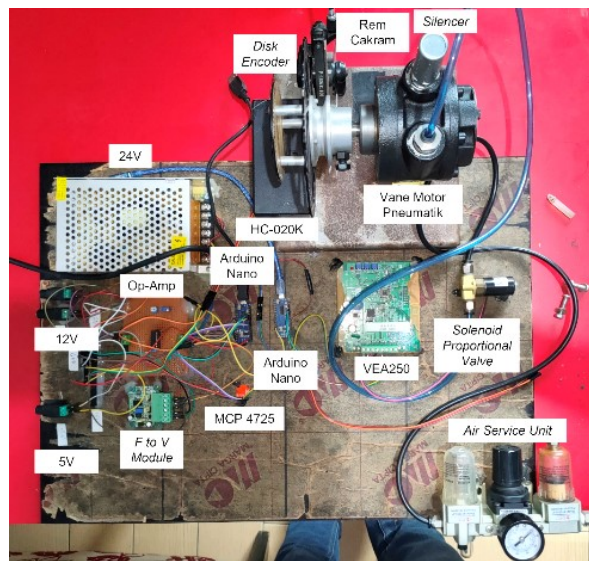
Tabel 1. Basis aturan logika fuzzy

E/dE	N	Z	P
N	SK	K	N
Z	K	N	B
P	N	B	SB

Kemudian, setelah ditetapkan fungsi keanggotaan pada bagian masukan dan keluaran, langkah selanjutnya adalah menentukan basis aturan yang akan digunakan dalam proses mekanisme pengambilan keputusan. Jumlah dari basis aturan didasarkan pada jumlah himpunan yang terdapat pada fungsi keanggotaan masukan. Dikarenakan terdapat tiga himpunan pada setiap fungsi keanggotaan masukan, maka terdapat sembilan basis aturan yang disusun berdasarkan logika menggunakan mekanisme *if-then*, seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Tabel basis aturan ini dirancang berdasarkan perilaku respon dinamik agar nilai keluaran selalu terjaga pada *setpoint* yang dikehendaki.



Gambar 5. Diagram blok perangkat keras



Gambar 6. Realisasi perangkat keras

C. Perangkat Keras

Secara umum, perangkat keras terdiri dari tiga bagian, yaitu bagian suplai pneumatik, motor pneumatik, dan bagian pengendali elektrik seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Pada bagian suplai pneumatik terdiri dari kompresor elektrik $\frac{3}{4}$ Hp dan *air service unit* dengan tekanan maksimum 10 bar. Pada bagian motor pneumatik, digunakan jenis motor dengan torsi maksimum 2,8 Hp, tekanan udara 7 bar, dan kecepatan maksimum 4000 rpm. Motor pneumatik ini dapat diatur kecepatannya menggunakan katup proporsional satu arah 1/8 dengan tegangan 24 VDC. Kemudian pada bagian pengendali terdapat sensor kecepatan *optocoupler* HC-020K dengan 60 lubang *counter* yang menghasilkan sinyal pulsa. Modul *F to V* berfungsi mengubah frekuensi ke tegangan, mikrokontroler menggunakan Arduino Uno, dan modul *driver* yang terdiri dari modul *Digital to Analog Converter* (DAC) MCP425 dan penguat tegangan VEA250.

Perangkat keras kemudian direalisasikan, seperti ditunjukkan pada Gambar 6.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Tapis Kalman

Pengujian tapis Kalman dilakukan untuk mengetahui respon keluaran dari sensor kecepatan sebelum dan setelah diterapkannya tapis Kalman. Pengujian dilakukan dengan cara mengambil data kecepatan motor pneumatik pada saat keadaan tunak di kecepatan 280 RPM secara jerat terbuka. Data pengukuran kemudian diamati untuk nilai $Q = 1$, $Q = 10$, dan $Q = 100$. Untuk nilai R ditetapkan sebesar 0,1 yang diambil dari nilai varian data sensor tanpa tapis Kalman. Data hasil pengujian kemudian dianalisis menggunakan *Integral Absolute Error* (IAE), seperti pada persamaan (8).

$$IAE = \int |e| dt \quad (8)$$

dimana $|e|$ adalah nilai mutlak galat yang diperoleh dari selisih antara nilai referensi kecepatan dan keluaran sensor. Adapun hasil pengujian, seperti ditunjukkan pada Gambar 7.

Berdasarkan hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai Q menyebabkan hasil penapisan sinyal yang semakin baik. Hal ini dibuktikan dengan nilai IAE seperti ditunjukkan pada Tabel 2, dimana nilai Q terbesar menghasilkan IAE terkecil. Akan tetapi, semakin besar nilai Q dapat menyebabkan adanya keterlambatan respon pada bagian transien. Selanjutnya, nilai $Q = 100$ dan $R = 0,1$ dipilih sebagai parameter tapis Kalman yang akan diterapkan pada pengendalian kecepatan motor pneumatik.

B. Pengujian Pengendalian Tanpa Gangguan

Setelah dilakukan pengujian tapis Kalman, selanjutnya menguji pengendali logika fuzzy dengan menerapkan tapis Kalman pada bagian keluaran. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui respon pengendalian tanpa gangguan dengan nilai referensi 250 RPM. Adapun hasil pengujian tanpa gangguan, seperti ditunjukkan pada Gambar 8.

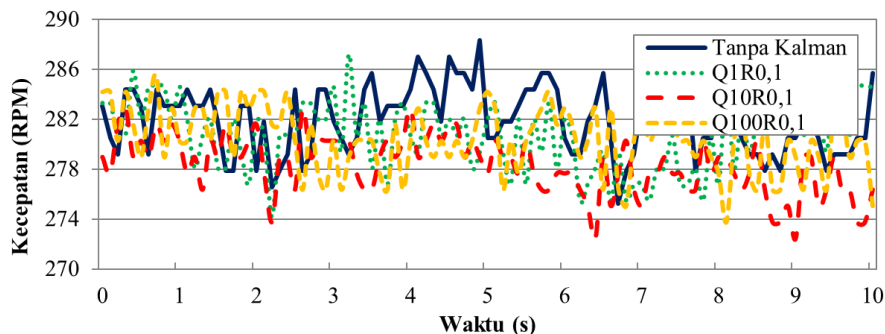
Berdasarkan hasil pengujian terlihat bahwa pengendali yang dirancang mampu mengendalikan kecepatan motor sesuai dengan referensi yang diberikan. Tabel 3 menunjukkan parameter respon kecepatan pada kondisi transien dan keadaan tunak. Respon kecepatan dapat menuju referensi dengan *rise time* dan *settling time* kurang dari 5 detik tanpa adanya *overshoot*. Akan tetapi, pada keadaan tunak terdapat *error steady-state* sebesar 1,6%. Hal ini terjadi karena pengendali logika fuzzy tidak dapat menjamin *error steady-state* 0%.

Tabel 2. Perbandingan nilai IAE untuk setiap nilai Q

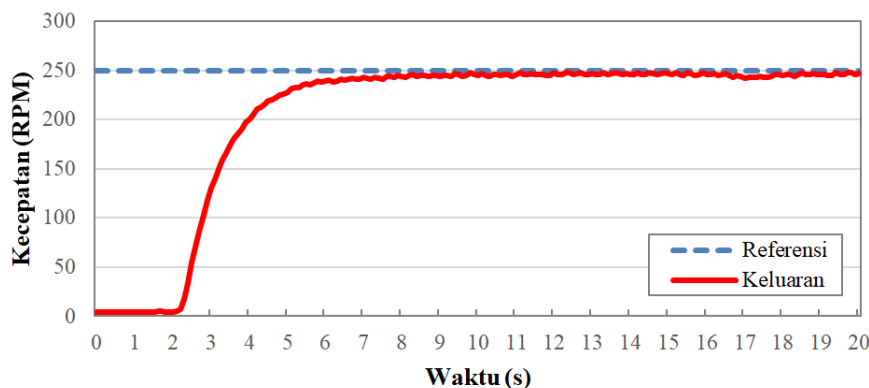
Q	IAE
0 (Tanpa Kalman)	272,9
1	255,2
10	222,5
100	212,8

Tabel 3. Parameter respon kecepatan tanpa gangguan

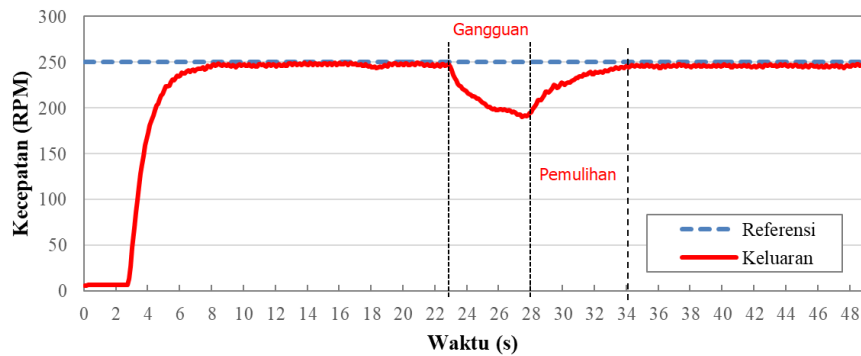
Karakteristik	Nilai
Rise time (s)	4,3
Settling time (s)	4,3
Overshoot (%)	0
Error steady-state (%)	1,6



Gambar 7. Pengujian tapis Kalman pada kecepatan 280 RPM



Gambar 8. Respon kecepatan motor pneumatik pada referensi 250 RPM tanpa gangguan



Gambar 9. Respon kecepatan motor pneumatik pada referensi 250 RPM dengan gangguan

Tabel 4. Parameter respon pemulihan kecepatan dengan gangguan

Karakteristik	Nilai
Rise time (s)	5,8
Settling time (s)	5,8
Overshoot (%)	0

C. Respon Kecepatan Dengan Gangguan

Pengujian dengan gangguan bertujuan untuk mengetahui seberapa kokoh pengendalian kecepatan yang dilakukan. Pengujian dilakukan dengan cara memberikan gangguan berupa pengereman sesaat pada kondisi kecepatan keadaan tunak di detik ke-23 sampai detik ke-28. Kemudian dilepaskan kembali dan dilihat respon pemulihan yang dihasilkan. Adapun respon kecepatan dengan gangguan, seperti ditunjukkan pada Gambar 9.

Hasil pengujian dengan gangguan menunjukkan bahwa pengendali yang dirancang mampu memulihkan kecepatan setelah diberi gangguan. Tabel 4 menunjukkan parameter respon pemulihan dimana kecepatan motor dapat kembali ke nilai referensi selama kurang dari 6 detik tanpa adanya *overshoot*.

IV. KESIMPULAN

Pengendalian kecepatan motor pneumatik menggunakan pengendali logika fuzzy dengan tambahan tapis Kalman telah berhasil dirancang dan direalisasikan. Hasilnya menunjukkan bahwa tapis Kalman mampu memperbaiki data keluaran sensor dengan mengatur konstanta Q. Semakin besar konstanta Q semakin baik proses tapis yang dilakukan. Tapis Kalman juga telah dapat diintegrasikan dengan pengendali logika fuzzy untuk mengendalikan kecepatan motor pneumatik. Hasilnya menunjukkan bahwa pengendali yang dirancang mampu menghasilkan respon kecepatan sesuai referensi kurang dari 5 detik dengan adanya error steady-state kurang dari 2%. Jika diberi

gangguan, respon kecepatan mampu kembali menuju referensi dalam waktu kurang dari 6 detik. Akan tetapi, pengendali logika fuzzy yang dirancang tidak dapat menjamin error steady-state 0%. Penelitian selanjutnya adalah merancang pengendali yang lebih kokoh agar dihasilkan respon kecepatan dengan error steady-state 0%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (P3M) Politeknik Negeri Bandung atas dukungan pendanaan Penelitian dengan Nomor Kontrak B/92.13/PL1.R7/PG.00.03/2023.

REFERENSI

- [1] K. A. Roni and C. Cekdin, *Sistem Kendali Proses Produksi*. Penerbit Andi, 2020.
- [2] A. Ma'arif, I. Iswanto, A. A. Nuryono, and R. I. Alfian, "Kalman Filter for Noise Reducer on Sensor Readings," *Signal Image Process. Lett.*, vol. 1, no. 2, pp. 11–22, 2019.
- [3] Q. Lim, Y. He, and U. X. Tan, "Real-Time Forward Collision Warning System Using Nested Kalman Filter for Monocular Camera," *2018 IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, ROBIO 2018*, pp. 868–873, 2018.
- [4] M. Schimmack, B. Haus, and P. Mercorelli, "An Extended Kalman Filter as an Observer in a Control Structure for Health Monitoring of a Metal-Polymer Hybrid Soft Actuator," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 23, no. 3, pp. 1477–1487, 2018.
- [5] A. Poullose, B. Senouci, and D. S. Han, "Performance Analysis of Sensor Fusion Techniques for Heading Estimation Using Smartphone Sensors," *IEEE Sens. J.*, vol. 19, no. 24, pp. 12369–12380, 2019.
- [6] F. A. Ruslan, A. M. Samad, and R. Adnan, "Modelling of flood prediction system using hybrid NNARX and Extended Kalman Filter," *Proc. - 2017 IEEE 13th Int. Colloq. Signal Process. its*

- Appl. CSPA 2017*, no. March, pp. 149–152, 2017.
- [7] W. P. Nwadiugwu, S. H. Kim, and D. S. Kim, “Precise-point-positioning estimations for recreational drones using optimized cubature-extended kalman filtering,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 134369–134383, 2021.
 - [8] X. Liu, X. Liu, W. Zhang, and Y. Yang, “Interacting Multiple Model UAV Navigation Algorithm Based on a Robust Cubature Kalman Filter,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 81034–81044, 2020.
 - [9] W. Song, “An integrated GPS/vision UAV navigation system based on Kalman filter,” *Proc. 2020 IEEE Int. Conf. Artif. Intell. Inf. Syst. ICAIIS 2020*, pp. 376–380, 2020.
 - [10] P. Niedermayr, L. Alberti, S. Bolognani, and R. Abl, “Implementation and Experimental Validation of Ultrahigh-Speed PMSM Sensorless Control by Means of Extended Kalman Filter,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 10, no. 3, pp. 3337–3344, 2022.
 - [11] X. Lai, T. Yang, Z. Wang, and P. Chen, “IoT implementation of Kalman Filter to improve accuracy of air quality monitoring and prediction,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 9, 2019.
 - [12] G. Ariante, U. Papa, S. Ponte, and G. Del Core, “UAS for positioning and field mapping using LIDAR and IMU sensors data: Kalman filtering and integration,” *2019 IEEE 5th Int. Work. Metrol. Aerosp.*, no. July, pp. 522–527, 2019.
 - [13] F. Z. Raihan, B. Setiadi, H. Purnama, V. A. Wijayakusuma, and K. Kunci, “Kendali Kecepatan Vane Motor Pneumatik Berbasis Kendali Fuzzy,” pp. 4–5, 2021.
 - [14] B. Setiadi, S. W. Jadmiko, H. Purnama, and F. Z. Raihan, “Aplikasi Algoritma Fuzzy Sugeno pada Kendali Kestabilan Putaran Motor Pneumatik,” vol. 7, no. 1, pp. 143–148, 2022.
 - [15] A. A. Ashari, E. Setiawan, and D. Syauqi, “Sistem Navigasi Waypoint Pada Robot Beroda Berdasarkan Global Positioning System Dan Filter Kalman,” vol. 4, no. 7, pp. 2075–2082, 2020.
 - [16] Y. Xu, K. Xu, J. Wan, Z. Xiong, and Y. Li, “Research on Particle Filter Tracking Method Based on Kalman Filter,” *Proc. 2018 2nd IEEE Adv. Inf. Manag. Commun. Electron. Autom. Control Conf. IMCEC 2018*, no. Imcec, pp. 1564–1568, 2018.