

Aplikasi Algoritma *Fuzzy* Sugeno pada Kendali Kestabilan Putaran Motor Pneumatik

Budi Setiadi[#], Sarjono Wahyu Jadmiko, Hari Purnama, Fryma Zhafran Raihan, Varian Andika Wijayakusuma, Tata Supriyadi, Ridwan Solihin, Sudrajat, Hilmi Dhiya Ulhaq
Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung
Jl. Gegerkalong Hilir, Ds. Ciwaruga, Kabupaten Bandung Barat 40559, Indonesia
[#]budi.setiadi@polban.ac.id

Abstrak

Penggunaan penggerak motor listrik dalam industri proses berisiko menimbulkan terjadinya percikan api akibat arus hubung singkat dan pembentukan medan elektromagnetik. Kontaminasi bahan kimia dengan percikan api dan medan elektromagnetik berisiko menimbulkan terjadinya kebakaran. Dengan demikian, penggunaan motor pneumatik dapat dijadikan alternatif solusinya. Fokus penelitian ini yaitu melakukan pengendalian kestabilan putaran pada penggerak motor pneumatik agar dapat bergerak stabil pada saat kondisi normal maupun diberi gangguan menggunakan algoritma *fuzzy logic*. Motor pneumatik berputar dengan sumber energi angin yang berasal dari kompresor. Untuk menjaga kestabilan putaran, aliran angin yang melewati motor pneumatik diatur melalui besar kecil bukaan katup selenoid proporsional. Besar kecil bukaan katup diatur secara elektronik melalui perangkat pengendali dengan memperhatikan umpan balik dari sensor kecepatan. Nilai sensor kecepatan dibandingkan dengan nilai *setpoint* sehingga menghasilkan variabel *error* dan *delta error* sebagai acuan masukan pengendali. Keluaran sistem pengendali berupa pengambilan keputusan besar kecilnya bukaan katup berdasarkan hasil inferensi *fuzzy* Sugeno. Hasil pengujian secara keseluruhan menunjukkan motor pneumatik dapat berputar stabil dengan *error steady state* 0,656% pada tekanan sumber 3,2 bar.

Kata kunci: motor pneumatik, katup proporsional, kestabilan putaran, *fuzzy* Sugeno

Abstract

The use of electric motor drives in the process industry has the risk of causing sparks due to short circuit currents and the formation of electromagnetic fields. Chemical contamination with sparks and electromagnetic fields poses a risk of fire. Thus, the use of pneumatic motors can be used as an alternative solution. The focus of this research is to control the rotational stability of the pneumatic motor drive so that it can move stable under normal conditions or is disturbed using fuzzy logic algorithms. The pneumatic motor rotates with the wind energy source coming from the compressor. To maintain the stability of rotation, the flow of wind through the pneumatic motor is regulated through the size of the proportional solenoid valve opening. The size of the valve opening is regulated electronically through the control device by paying attention to feedback from the speed sensor. The speed sensor value is compared with the setpoint value so as to produce error and delta error variables as a reference for controller input. The output of the control system is a decision making of the size of the valve opening based on the results of Sugeno's fuzzy inference. The overall test results show that the pneumatic motor can rotate stably with a steady state error of 0.656% at a source pressure of 3.2 bar.

Keywords: pneumatic motor, proportional valve, rotation stability, *fuzzy* Sugeno

I. PENDAHULUAN

Pada suatu industri proses, bahan dasar campuran dalam pembuatan cat menggunakan senyawa kimia titanium dioksida (TiO_2). Bahan ini sangat mudah terbakar (standar NFPA 921), baik bentuk serbuk, cairan, bahkan gasnya jika terkena benda-benda panas, percikan api, maupun pengaruh

suhu lingkungan yang ekstrim [1], [2]. Untuk menghasilkan kualitas warna yang sesuai dengan standar internasional ASTM D 1210-96, tahapan proses pembuatan cat harus sesuai. Salah satu tahapan prosesnya adalah kestabilan putaran pengadukan [3]. Sistem yang tersedia dan hasil penelitian saat ini menggunakan motor listrik sebagai penggerak pengaduknya [4].

Penelitian terkait implementasi sistem pengadukan cat dan pengendalian penggerak motor telah banyak dilakukan. Proses pengadukan menggunakan motor listrik tanpa pengendalian [4]–[6] dan dengan pengendalian *fuzzy* [7] serta Proporsional Integral Derivatif (PID) [8] telah banyak diteliti. Pengadukan dilakukan melalui beberapa percobaan dengan mempertimbangkan pola waktu dan kestabilan putaran pengadukan. Percobaan setiap pola dilakukan secara manual dan dibandingkan hasilnya sampai didapat nilai yang memenuhi standar ASTM D 1210-96. Pengadukan dilakukan secara otomatis berdasar parameter waktu dengan tampilan *graphical user interface* (GUI) Visual Basic dan antarmuka mikrokontroler Arduino, GUI sekaligus antarmuka PLC TWIDO ke pengadukan motor listrik. Sedangkan khusus pengendalian menggunakan metode PID, *fuzzy*, dan ANFIS dapat menghasilkan luaran kestabilan [7]–[12]. Metode PID tertanam di mikrokontroler Arduino Uno dan metode *fuzzy* tertanam di komputer (Labview) untuk mempertahankan kecepatan putaran motor listrik pada saat normal maupun diberi gangguan [7], [8]. Pengendalian kestabilan penggerak motor dan silinder pneumatik juga dapat dilakukan menggunakan metode *fuzzy* dan *adaptive neuro fuzzy inference system* (ANFIS). Aliran udara dari kompresor yang mengalir ke penggerak diatur melalui bukaan besar kecil katup solenoid [9]–[12]. Umpan balik kecepatan dari sensor *encoder* dibandingkan dengan *setpoint* sebagai koreksi *error* kecepatan. Sedangkan umpan balik posisi dari ultraviolet (UV) dibandingkan dengan *setpoint* sebagai koreksi *error* posisi [11], [12].

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem kestabilan putaran motor pneumatik 4 *vane* pada kondisi normal dan diberi gangguan 5% dan 10%. Gangguan dilakukan secara mekanik dengan rem tangan yang dikopel dengan as motor pneumatik. Putaran motor pneumatik stabil diatur pada *setpoint* 250 rpm dengan target *error* kurang dari 2%. Perbedaan terhadap penelitian sebelumnya adalah pengendali pada penelitian ini menggunakan algoritma *fuzzy* Sugeno dengan inferensi dan rentang nilai parameter himpunan masukan, serta perangkat keras umpan balik putaran berupa pulsa yang dikonversi menjadi tegangan dan dikuatkan menggunakan Op-Amp.

II. METODE PENELITIAN

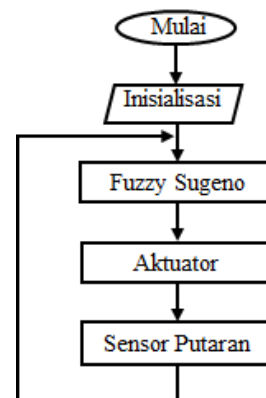
Tahapan proses pengendalian kestabilan putaran motor pneumatik yang kami usulkan dibagi menjadi dua bagian, yaitu perangkat lunak dan perangkat keras. Pada bagian perangkat lunak akan dibahas

bagaimana algoritma pengendalian dirancang, sedangkan bagian perangkat keras dibagi menjadi dua, yaitu pengendalian elektronik dan mekanikal pneumatik.

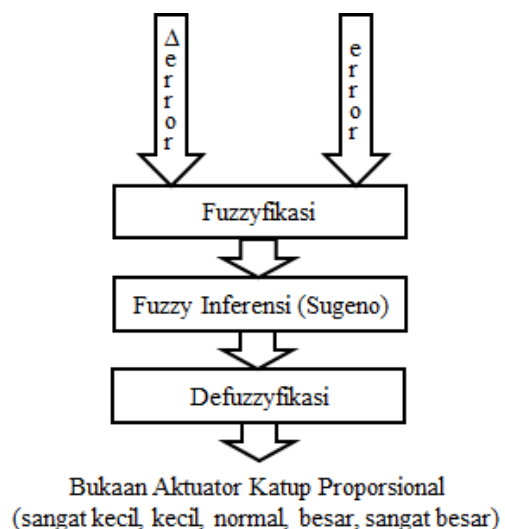
A. Perangkat Lunak

Gambar 1 menunjukkan proses pengendalian menggunakan algoritma *fuzzy* Sugeno. Inisialisasi berisi nilai parameter dan variabel yang digunakan pada pengendalian (*setpoint*, aturan *fuzzy*, himpunan, dan kalibrasi) serta *library* sensor dan *driver*. *Fuzzy* Sugeno merupakan pengendalian pengambilan keputusan untuk aktuatur. Nilai pengambilan keputusan mengendalikan besar kecil bukaan aktuatur yang terhubung secara mekanik ke *plant* motor pneumatik. Sensor putaran membaca kecepatan dari *plant* dan umpan balik *fuzzy* Sugeno. Gambar 2 menunjukkan proses algoritma *fuzzy* Sugeno.

Parameter nilai masukan *fuzzy* Sugeno merupakan selisih antara *setpoint* dengan umpan balik sensor putaran. Hasil dari selisih tersebut



Gambar 1. Diagram alir perangkat lunak



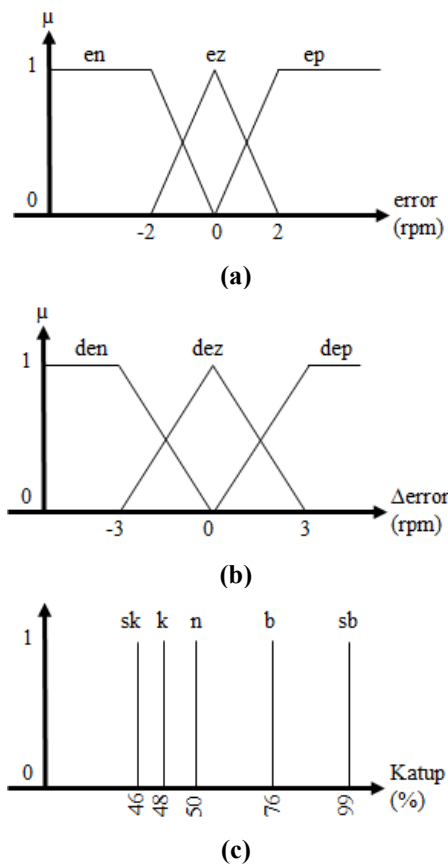
Gambar 2. Proses algoritma *fuzzy* Sugeno

merupakan *error*. Proses ini dipengaruhi oleh perubahan waktu, sehingga didefinisikan

$$Error(t) = SP(t) - PV(t) \quad (1)$$

$$\Delta Error(t) = Error(t) - Error(t - 1) \quad (2)$$

dimana $Error(t)$ merupakan nilai *error* saat ini. $SP(t)$ merupakan nilai *setpoint* yang telah didefinisikan. $PV(t)$ merupakan umpan balik dari sensor putaran. $\Delta Error(t)$ merupakan perubahan *error* dan $Error(t - 1)$ merupakan nilai *error* sebelumnya. Fuzzifikasi berisi himpunan variabel *linguistic* masukan *error* dan *delta error* serta keluaran (pulsa). Selanjutnya dicari nilai derajat keanggotaannya menggunakan proses logika AND dan selanjutnya diinferensi (pemetaan variabel masukan terhadap aturan yang telah didefinisikan) dengan metode Sugeno. Inferensi Sugeno didefinisikan dengan sembilan aturan, seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Defuzzifikasi merupakan luaran pengendalian berupa pengambilan keputusan antara hasil pemetaan dengan variabel keluaran untuk mengatur bukaan besar kecil aktuatur. Arsitektur fuzzy Sugeno dengan variabel masukan *error*, *delta error*, dan keluaran (pulsa) ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Arsitektur fuzzy Sugeno: (a) masukan *error*, (b) Masukan *delta error*, (c) keluaran pulsa

Tabel 1. Aturan fuzzy Sugeno

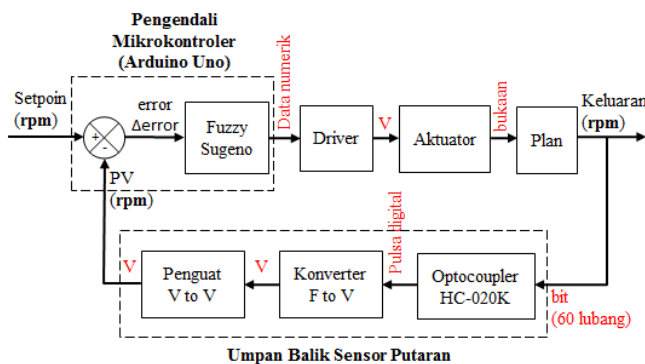
Error/dError	en	ez	ep
den	sk	k	n
dez	k	n	b
dep	n	b	sb

Pada himpunan fungsi keanggotaan, μ adalah nilai derajat keanggotaan, en (*error negatif*), ez (*error zero*), ep (*error positif*), den (*delta error positif*), dez (*delta error zero*), dep (*delta error positif*), sk (*sangat kecil*), k (*kecil*), n (*normal*), b (*besar*), dan sb (*sangat besar*).

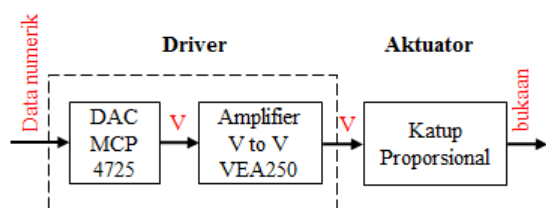
Gambar 3(a) menunjukkan nilai masukan untuk proses pencarian derajat keanggotaan *error*. Gambar 3(b) menunjukkan nilai masukan untuk proses pencarian nilai derajat keanggotaan *delta error*. Gambar 3(c) menunjukkan persentasi bukaan katup proporsional dari hasil pengambilan keputusan fuzzy Sugeno. Katup terhubung secara mekanik ke *plant* motor pneumatik. Fungsi aktuatur tersebut mengatur besar kecil laju aliran angin dari sumber energi (kompresor) menuju ke *plant* motor pneumatik.

B. Perangkat Keras Elektronik

Gambar 4 menunjukkan blok diagram sistem kendali yang dirancang. Secara sistem terbagi menjadi tiga bagian utama, yaitu masukan, pengendalian, dan keluaran. Masukan terdiri dari dua, yaitu masukan perangkat keras dari umpan balik sensor putaran dan masukan perangkat lunak *setpoint* 250 rpm yang tertanam langsung sebagai variabel numerik di program. Umpan balik tegangan dari blok penguat V to V dikonversi mikrokontroler melalui fasilitas *analog to digital converter* (ADC) menjadi data numerik dengan resolusi 10 bit. Pengendalian menggunakan mikrokontroler *platform* Arduino Uno berfungsi sebagai pusat proses pengolahan digital dan tertanam algoritma fuzzy Sugeno. Keluaran sistem pengambilan keputusan fuzzy Sugeno berupa nilai numerik dengan resolusi 10 bit. Data numerik tersebut dikonversi menjadi level tegangan analog 0 s.d 24 VDC melalui blok *driver*. Blok aktuatur merupakan komponen hibrid (masukan listrik keluaran mekanik). Aktuatur mengkonversi masukan tegangan menjadi keluaran bukaan besar kecil katup. Besar kecil bukaan katup berfungsi untuk mengalirkan aliran angin ke blok *plant* mekanik dan motor berputar. Untuk dapat mempertahankan kestabilan putaran, sistem dibuat *loop* tertutup dengan menggunakan umpan balik sensor putaran. Pada *plant* dipasang piringan untuk pembacaan putaran. Satu putaran menghasilkan 60 bit atau pulsa mekanik. Blok *optocoupler* mengkonversi pulsa mekanik menjadi pulsa digital



Gambar 4. Blok diagram sistem kendali dan elektronik



Gambar 5. Blok diagram elektronik driver dan aktuator

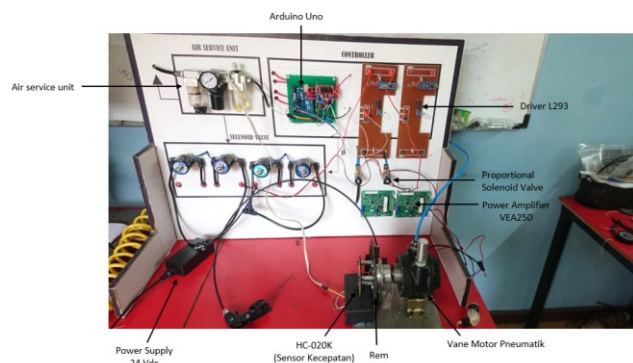
bertegangan dengan lebar frekuensi yang dipengaruhi waktu dan kecepatan putaran. Selanjutnya sinyal frekuensi dikonversi menjadi tegangan analog (V) melalui blok konverter F to V. Keluaran tegangan analog dari blok F to V rentang nilainya kecil antara 0 s.d 900 mVDC. Kemudian dikuatkan kembali blok V to V untuk mendapatkan rentang akurasi yang lebih lebar. Penguat tegangan menggunakan IC LM324 dengan *gain* 3,5 kali. Pengaturan penguatan menggunakan perbandingan resistor 1 K Ω terhadap trimpot 100 K Ω .

Gambar 5 menunjukkan blok diagram elektronik untuk *driver* dan aktuator. *Driver* terdiri dari dua tahap, yaitu mengkonversi data numerik menjadi sinyal tegangan analog (0 s.d 5VDC) dan konversi tegangan analog (0 s.d 5VDC menjadi 0 s.d 24VDC). *Driver* DAC yang digunakan MCP 4725 memiliki resolusi 10 bit. *Driver* amplifier VEA250 selain berfungsi untuk menaikkan tegangan sekaligus penguat arus. Besar kecilnya bukaan aktuator katup proporsional bergantung masukan tegangan analog yang diterima (rentang bukaan 0 s.d 100% dengan tegangan analog 0 s.d 24VDC).

Tabel 2 menunjukkan spesifikasi komponen elektronik yang digunakan. Penggunaan komponen telah dilakukan pemilihan dengan mempertimbangkan kebutuhan sesuai target luaran penelitian. Khusus *driver* untuk aktuator menggunakan komponen standar digunakan industri, sehingga akurasi yang dihasilkan dapat maksimal.

Tabel 2. Spesifikasi perangkat keras elektronik

No.	Komponen	Keterangan
1	Mikrokontroler	ATMega328 berbasis Arduino Uno; 10 bit ADC; PWM; serial
2	MCP 4725	DAC 10 bit; I2C; 5VDC
3	VEA250	<i>Power amplifier</i> , masukan 0 s.d 5VDC; 4 s.d 20 mADC; keluaran 0 s.d 24 VDC; disipasi daya 4 W
4	HC-020K	Optocoupler; 5VDC
5	F to V	0 s.d 10 KHz; masukan <i>single/double</i> pulsa; keluaran 0 s.d 10VDC
6	LM324	Op-Amp; <i>single supply</i> 12 VDC
7	Resistor	1 K Ω ; ¼ W
8	Trimpot	Multiturn; 100 K Ω ; ¼ Watt
9	Power Supply	24 VDC; 12VDC; 5VDC; 2 Ampere



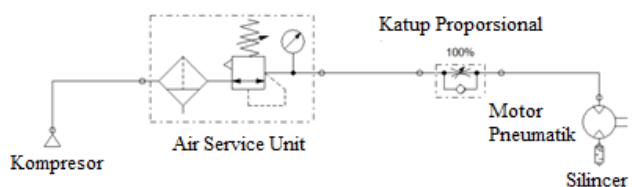
Gambar 6. Realisasi sistem

Gambar 6 menunjukkan realisasi sistem kestabilan putaran motor pneumatik. Modul dibangun pada skala industri untuk aktuator dan *plant* yang digunakan, sedangkan kontrolernya menggunakan standar pendidikan.

C. Mekanik Pneumatik

Gambar 7 menunjukkan rancangan mekanik sistem pneumatik. Kompresor berfungsi menyalurkan sumber energi (angin) ke sistem. *Air service unit* berfungsi melakukan *filter* pemisahan uap air dari angin, regulator tekanan, dan pelumasan ke saluran sistem. Sedangkan *silencer* berfungsi sebagai saringan dan peredam suara.

Tabel 3 menunjukkan spesifikasi komponen pneumatik yang digunakan. Seluruh komponen yang digunakan adalah standar industri.



Gambar 7. Rancangan pneumatik

Tabel 3. Spesifikasi sistem pneumatik

No	Komponen	Keterangan
1	Kompresor	Silent; elektrik; ¾ Hp
2	Air Service Unit	Lubrikan; regulator; pelumasan; maks. 10 bar
3	Katup proporsional	Satu arah; 1/8; 0,7 Mpa; analog 24 VDC; 4 W; selang 6 mm
4	Motor pneumatik	2,8 Hp; 7 Bar; 4000 rpm
5	Silencer	1/8

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk melihat unjuk kerja, sistem diuji melalui dua tahap. Tahap pertama pengujian rancangan algoritma fuzzy Sugeno secara simulasi menggunakan Toolbox Matlab. Tahap kedua pengujian sistem keseluruhan meliputi perangkat elektronik dan pneumatik.

A. Pengujian Algoritma Fuzzy

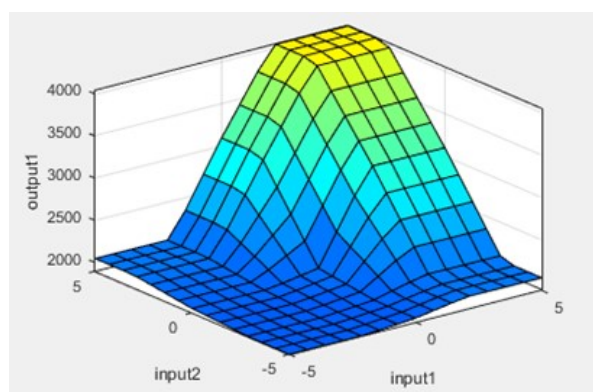
Tahapan ini membandingkan algoritma fuzzy Sugeno yang telah dibuat dan tertanam di mikrokontroler dengan Toolbox fuzzy Sugeno di Matlab. Pengujian dilakukan dengan memberikan nilai *error* dan *delta error*. Pengujian dilakukan secara acak sebanyak 8 kali. Tabel 4 menunjukkan perbandingan hasil pengujian antara Matlab dengan mikrokontroler. Hasil pengujian menunjukkan rata-rata perbedaan 1,24% antara hasil mikrokontroler dengan data Matlab. Dengan demikian, algoritma tertanam dapat digunakan untuk diimplementasikan. Gambar 8 menunjukkan sampel grafik *surface* hasil pengujian percobaan ke-4 menggunakan Matlab.

B. Pengujian Sistem Perangkat Keras

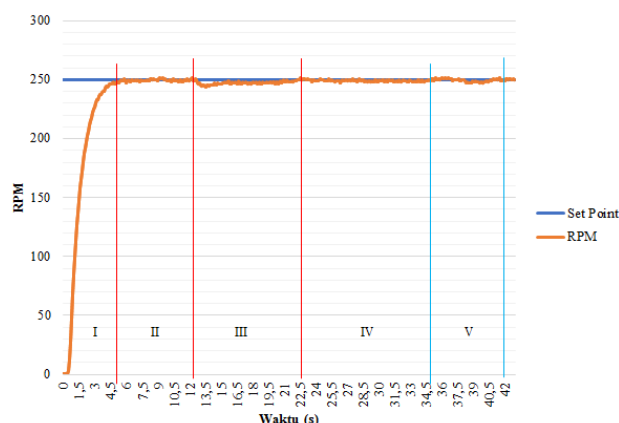
Pengujian sistem perangkat keras meliputi elektronik dan pneumatik. Tekanan aliran angin yang masuk ke sistem diatur satbil pada regulator 3,2 bar dan *setpoint* 250 rpm. Pengujian dilakukan menjadi tiga bagian, yaitu tanpa gangguan, gangguan 5% dan 10%. Jenis gangguannya berupa aksi pengereman mekanik secara manual dengan menarik tuas rem. Gambar 9 menunjukkan grafik hasil pengujian tanpa gangguan dan diberi gangguan 5%, sedangkan Gambar 10 menunjukkan grafik hasil pengujian tanpa gangguan dan diberi gangguan 10%.

Tabel 4. Perbandingan hasil pengujian algoritma fuzzy Sugeno

No	Error	Delta error	Data numerik	
			Mikro	Matlab
1	-1,62 (en)	-3,26 (den)	1909	1910
2	-1,3 (en)	0 (dez)	1985	1980
3	0 (ez)	-3,1 (den)	1950	1950
4	0 (ez)	2 (dep)	2750	2750
5	1,25 (ep)	0 (dez)	2706	2710
6	-1,5 (en)	-1,5 (dep)	2141	2140
7	1,5 (ep)	-3,15 (den)	2025	2030
8	1,2 (ep)	2,7 (dep)	3487	3470

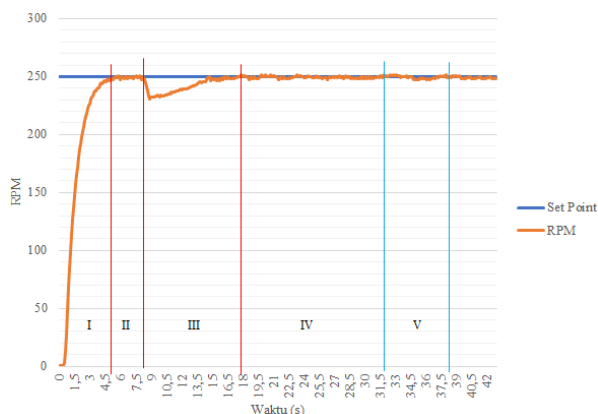


Gambar 8. Hasil pengujian percobaan ke-4 Matlab



Gambar 9. Grafik hasil pengujian tanpa dan gangguan 5%

Garis tebal warna orange (RPM) menunjukkan data keluaran sistem dimana romawi I (*response time*), II (*error steady state*), III (gangguan), IV (perbaikan sistem pada saat diberi gangguan), dan V (gangguan dihilangkan). I menunjukkan sistem bekerja dengan baik tanpa *overshoot* dengan *response time* 5 s. II menunjukkan sistem dapat stabil dengan *error steady state* (ESS) 0,656%. Hasil pengujian Gambar 9 dan Gambar 10 mendapatkan pembacaan kecepatan putaran rata-rata konstan di 251,64 rpm.



Gambar 10. Grafik hasil pengujian tanpa dan gangguan 10%

Bagian III pada Gambar 9 menunjukkan sistem diberi gangguan 5% tepat di waktu 12 s. Pada kondisi ini putaran motor menjadi 241 rpm. Sistem dapat memperbaiki ke ESS di waktu 16,5 s (memerlukan waktu 4,5 s). Pada bagian III Gambar 10 menunjukkan sistem diberi gangguan 10% tepat di waktu 8 s dan menyebabkan putaran motor menjadi 228 rpm. Sistem dapat memperbaiki ke ESS di waktu 18 s (memerlukan waktu 10 s). IV menunjukkan sistem mencapai ESS pada saat diberi gangguan. V menunjukkan respon sistem pada saat gangguan dihilangkan. Secara keseluruhan sistem relatif stabil tidak terjadi *overshoot*.

IV. KESIMPULAN

Pengendalian kecepatan putaran motor pneumatik menggunakan algoritma fuzzy Sugeno telah berhasil dirancang dan diimplementasikan. Sistem dapat mempertahankan kestabilan dengan ESS sebesar 0,656% baik pada saat tanpa maupun dengan gangguan. Penelitian lebih lanjut akan dilakukan dengan mengembangkan metode PID, Fuzzy-PID, ANFIS, dan filter Kalman dengan masukan sumber energi angin (kompresor) pada tekanan yang berubah-ubah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tim peneliti mengucapkan terima kasih kepada P3M Politeknik Negeri Bandung atas pendanaan penelitian melalui skema Penelitian Peningkatan Kapasitas Program Studi dengan SK Nomor B/75.1/PL1.R7/PG.00.03/2021.

REFERENSI

- [1] Thermo Fisher Scientific, "Safety Data Sheet," *Mater. Saf. Data Sheet*, vol. 4, no. 1, pp. 8–10, 2012, [Online]. Available: https://us.vwr.com/assetsvc/asset/en_US/id/16490607/contents.
- [2] F. Freschi, M. Mitolo, and R. Tommasini, "Analysis of Causation of a Flour Dust Explosion in an Industrial Plant," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 6, pp. 5182–5186, 2017.
- [3] ASTM International, "Standard Test Method for Fineness of Dispersion of Pigment-Vehicle Systems by Hegman-Type Gage," *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. i, no. Reapproved 2010, pp. 1–12, 2005.
- [4] P. Waktu, "COLORANT DARI TITANIUM DIOKSIDA Bahan dan Alat," *Ratnawati, Yoshi Al*, pp. 61–65, 2018.
- [5] T. A. Rahmandika and F. Eliza, "Perancangan Sistem Pencampuran Cat Berbasis Mikrokontroler," *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, vol. 3, no. 1, pp. 209–222, 2022.
- [6] F. Fahmizal, D. B. Pratama, A. Priyatmoko, and M. R. F. Rahman, "Otomatisasi Proses Produksi Cat Berbasis Simulator Plc Twido Twldmda20Dtk," *JST (Jurnal Sains dan Teknol.)*, vol. 7, no. 1, pp. 49–58, 2018.
- [7] S. Triyani, "Kendali Kecepatan Motor DC Berbasis Fuzzy Setting Point pada Labview," *J. Appl. Electr. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 6–11, 2018.
- [8] R. Muhandian and K. Krisnadinata, "Kendali Kecepatan Motor DC Dengan Kontroller PID dan Antarmuka Visual Basic," *JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional)*, vol. 6, no. 1, pp. 328–339, 2020.
- [9] F. Z. Raihan, B. Setiadi, H. Purnama, and ..., "Kendali Kecepatan Vane Motor Pneumatik Berbasis Kendali Fuzzy," ... *Natl. Semin.*, pp. 4–5, 2021.
- [10] Widjonarko, R. Soenoko, S. Wahyudi, and E. Siswanto, "Design of Air Motor Speed Control System for Small Scale Compressed Air Energy Storage Using Fuzzy Logic," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 494, no. 1, 2019.
- [11] B. Setiadi, "Solar Tracker Elektro-Pneumatik Berbasis Kendali Fuzzy," *J. Rekayasa Hijau*, vol. 4, no. 3, pp. 179–190, 2020.
- [12] B. Baisrum, "Implementation of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Control on Pneumatic Solar Tracker," *Proc. 2nd Int. Semin. Sci. Appl. Technol. (ISSAT 2021)*, vol. 207, no. Issat, pp. 422–429, 2021.