

Analisis Otomatisasi Kalibrator Tekanan Udara Portabel dengan Pengontrol PID dengan Metode Ziegler-Nichols dan Åström-Hägglund

Budi Santoso¹, Masbah R.T. Siregar, Abdul Multi, Muhamad Ridwan⁴

^{1,2,3} Institut Sains dan Teknologi Nasional, ⁴Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika
Jalan Moh. Kahfi II Srengseng Sawah Jagakarsa Jakarta Selatan 12640 Jakarta, Indonesia
Program Studi Teknik Elektro, Teknis Elektronika dan Kendali FPs ISTN, Jakarta, Indonesia
Email: bsantoso24@gmail.com, mrtsiregar2012@istn.ac.id, amulti@istn.ac.id, ridwanandro@gmail.com

Abstract

Atmospheric pressure is one of the weather parameters that have an important role in meteorological services, especially in flight transportation. Atmospheric pressure sensors must be calibrated regularly to ensure the measurement results. The increasing number of atmospheric pressure sensors makes it impossible to calibrate in the laboratory because it can result in meteorological service downtime. Portable calibrators can be used to overcome this problem, by utilizing peristaltic pumps, solenoid valves, and microcomputers. The PID control is programmed on the microcomputer to control the speed of the peristaltic pump and the cycle of the solenoid valve to generate air pressure according to the set point determined automatically using the PID control. The Åström-Hägglund method has the lowest average stability uncertainty value at 0,003 hPa/

Abstrak

Tekanan udara merupakan salah satu parameter cuaca yang memiliki peran penting dalam layanan meteorologi, khususnya dalam aktivitas penerbangan. Sensor tekanan udara secara regulasi harus dikalibrasi secara rutin untuk memastikan hasil pengukurannya. Jumlah sensor tekanan udara yang semakin banyak, tidak memungkinkan dilakukan kalibrasi di laboratorium karena dapat mengakibatkan downtime layanan meteorologi. Kalibrator portabel dapat digunakan untuk mengatasi hal tersebut, dengan memanfaatkan pompa peristaltik, solenoid valve, dan mikrokomputer. Kontrol PID diprogram pada mikrokomputer untuk mengontrol kecepatan pompa peristaltik dan siklus solenoid valve untuk menghasilkan tekanan udara sesuai dengan set point yang ditentukan secara otomatis menggunakan kontrol PID. Metode Åström-Hägglund memiliki nilai rata-rata ketidakpastian baku stabilitas paling kecil yaitu 0,03 hPa.

Kata Kunci: meteorologi, tekanan udara, PID, kalibrasi

1. Pendahuluan

Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) merupakan institusi teknis di Indonesia yang memiliki tugas pokok dalam mengukur, mengamati, menganalisis untuk selanjutnya diolah menjadi informasi fenomena alam seperti cuaca, iklim dan geofisika[1]. Dalam melaksanakan tugas pokok di bidang layanan meteorologi, BMKG mengoperasikan berbagai peralatan elektronik yang berfungsi untuk memantau, mengukur dan mencatat fenomena cuaca, salah satunya adalah parameter tekanan udara.

Tekanan udara merupakan salah satu unsur yang sangat penting dalam melakukan prediksi cuaca maupun layanan cuaca lainnya seperti layanan untuk meteorologi maritim maupun penerbangan dan layanan meteorologi lainnya. Pada layanan meteorologi penerbangan, informasi tekanan udara akan digunakan untuk melakukan estimasi ketinggian pesawat terhadap permukaan landasan pacu dan menjadi sangat vital saat pesawat akan mendarat [2], [3]. Secara teknis, data tekanan udara akan diolah menjadi informasi density altitude yang berkaitan dengan posisi ketinggian

pesawat, dimana density altitude merupakan salah satu faktor cuaca yang berkontribusi terhadap kecelakaan pesawat [4]. Sedangkan dalam layanan meteorologi lainnya informasi tekanan udara dibutuhkan karena merupakan salah satu parameter yang berkaitan erat dengan variasi pembentukan arah dan kecepatan angin. Berdasarkan hal tersebut, proses menghasilkan data tekanan atmosfer menjadi sangat penting.

Sensor tekanan udara wajib dilakukan kalibrasi setiap satu tahun sekali, sehingga sensor mempunyai ketertelusuran pengukuran ke standar yang telah ditentukan. World Meteorological Organization dan International Civil Aviation Organization memiliki ketentuan ketidakpastian sensor tekanan udara yang akan digunakan untuk operasional pengamatan meteorologi dipersyaratkan di bawah 0.1 hPa [5].

Sesuai dengan ISO/IEC 17025:2017, kalibrasi dilakukan di laboratorium kalibrasi, namun pada kondisi yang khusus maka hal tersebut tidak dapat dilakukan. Karena alasan operasional layanan meteorologi lapangan yang mensyaratkan bahwa peralatan tidak boleh mati dalam jangka waktu tertentu untuk menjaga kontinuitas data. Salah satu upaya untuk menghindari *downtime* operasional pengamatan yaitu dengan cara penggunaan peralatan kalibrasi sensor tekanan udara yang bersifat *portable*. Dengan tersedianya peralatan kalibrasi sensor tekanan udara yang bersifat portable maka kegiatan kalibrasi sensor tekanan udara bisa dilakukan di lokasi sensor berada, *downtime* operasional pengamatan yang terjadi tidak terlalu lama, sehingga tidak mengganggu proses operasional pengamatan unsur tekanan udara. Salah satu solusi dalam mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan merancang pengkondisi tekanan udara portabel untuk mengakomodir kebutuhan peralatan kalibrasi lapang.

Pada penelitian ini akan dirancang peralatan kalibrasi sensor tekanan udara elektronik untuk kegiatan kalibrasi lapang yang stabil dan mudah dibawa. Kalibrator

tekanan dalam penelitian ini terdiri dari barometer standar, pompa peristaltik, *solenoid valve* dan mikrokomputer. Mikrokomputer digunakan untuk menerima masukan titik ukur dari operator, melakukan kalkulasi kendali tekanan udara, mengendalikan pompa peristaltik dan *solenoid valve* untuk kemudian menampilkan hasil kalibrasi kepada operator. Perancangan sistem akan didesain dengan menggunakan kontrol PID (Proporsional, Integratif, Derivatif) pada *solenoid valve* yang akan diimplementasikan pada rentang tekanan udara dari 925 hPa hingga 1050 hPa dengan titik ukur uji dilakukan pada setiap 25 hPa.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan cara perancangan perangkat keras meliputi mikrokomputer, pompa peristaltik dan solenoid valve serta perancangan perangkat lunak yang digunakan untuk memprogram mikrokomputer.

Kalibrator tekanan dalam penelitian ini terdiri dari standar barometer, pompa peristaltik, solenoid valve dan mikrokomputer. Mikrokomputer raspberry digunakan untuk menerima masukan titik ukur dari operator, melakukan kalkulasi kendali tekanan udara, mengendalikan pompa peristaltik dan solenoid valve untuk kemudian menampilkan hasil kalibrasi kepada operator. Desain akan dirancang dengan tipe yang mudah dibawa (portabel) agar dapat digunakan untuk mengkondisikan tekanan udara pada saat kalibrasi lapang.

Pompa yang digunakan untuk mengkondisikan tekanan udara adalah pompa peristaltik. Pompa tersebut digunakan karena dapat dioperasikan dengan berbagai media fluida, baik air ataupun cairan [6]

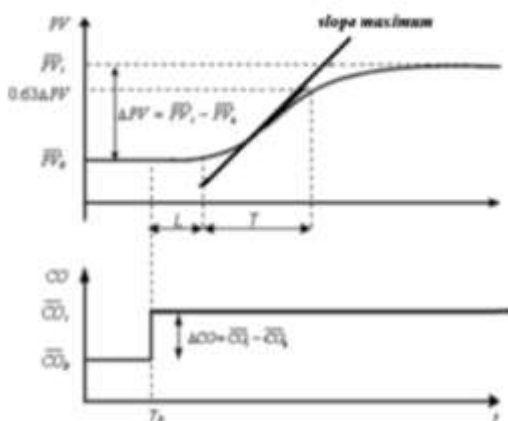
Stabilitas pengkondisi tekanan adalah salah satu kontribusi ketidakpastian terbesar dalam proses kalibrasi [7]. Untuk menghindari hal tersebut perlu menggunakan sistem kendali yang tepat agar dapat mengurangi ketidakpastian yang diperluas (U95). Pada penelitian ini

akan menganalisis metode tuning PID Ziegler-Nichols dan Åström–Hägglund.

Pengumpulan data dilakukan dengan melakukan percobaan pada tekanan antara 925 hPa hingga 1050 hPa, hal ini diasumsikan tekanan udara dilokasi tempat dipasangnya sensor tekanan udara adalah 1000 hPa, sehingga pengujian dilakukan dari kisaran nilai tekanan rata-rata dilokasi sensor.

A. Perancangan Sistem Kendali

Dalam perancangan sistem kendali, harus melakukan pengujian open loop dengan menggunakan metode reaksi proses atau Open loop step response. Metode reaksi proses diperlukan untuk mengetahui hubungan antara variable masukan dan keluaran sehingga dapat mengetahui karakter dan reaksi sistem kendali pada keadaan loop terbuka. Model reaksi proses dapat dibuat representasi model matematis atau sebagai fungsi alih kontrol proses first order plus dead time (FOPDT).



Gambar 1. Pengujian reaksi proses

Metode reaksi proses dilakukan dengan cara memberi perubahan tangga (step) sinyal output kontroler – CO oleh operator pada saat proses telah mengalami keadaan tunak di setpoint tertentu. Respon variabel output (PV) kemudian direkam dan dianalisa. Parameter yang didapat dari metode reaksi proses adalah keterlambatan waktu proses (L), konstanta waktu proses (T), dan penguat statis proses (K).

Tabel 1. Konstanta PID dengan metode

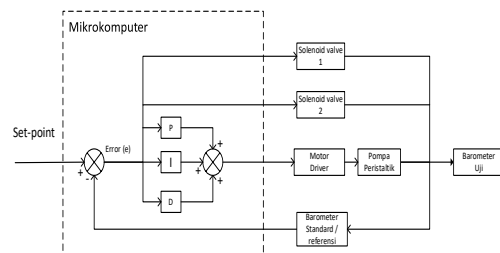
Ziegler-Nichols dan Åström–Hägglund

Metode	Kp	Ti	Td
Ziegler-Nichols	$\frac{1.2 * T}{K * L}$	2*L	0.5*L
Åström–Hägglund	$\frac{0.94 * T}{K * L}$	2*L	0.5*L

Hasil dari metode reaksi proses akan dimasukan kedalam konstanta parameter PID pada tabel 1 dan diaplikasikan ke kendali PID yang ditunjukkan pada persamaan 1.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \dots\dots(1)$$

Dimana u(t) adalah keluaran kendali, e(t) adalah error atau selisih antara setpoint dengan nilai tekanan udara yang dibaca sensor, Kp, Ki, Kd adalah konstanta PID untuk proporsional, integratif dan derivatif.



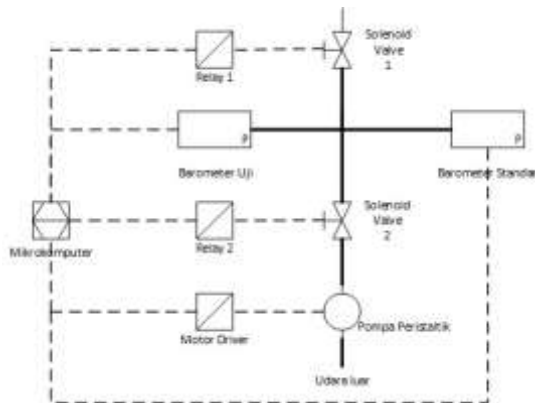
Gambar 2. Blok diagram kendali sistem kalibrator tekanan udara

Gambar 2. Menunjukkan blok diagram kendali sistem kalibrator tekanan udara. Hasil kalkulasi PID dikirim ke motor driver untuk kemudian diubah menjadi variasi tegangan untuk mengatur kecepatan pompa peristaltik.

Solenoid valve 1 merupakan katup solenoida yang menghubungkan sistem kalibrator dengan udara luar. solenoid valve 2 adalah katup solenoida yang menghubungkan pompa peristaltic dengan barometer referensi dan barometer uji. Jika terjadi tekanan berlebih atau kesalahan sistem yang menyebabkan pompa berjalan tidak terkendali, maka solenoid valve 1 terbuka dan solenoida 2 tertutup untuk menghindari kerusakan sensor pada barometer.

B. Perancangan Perangkat Keras

Diagram blok perancangan perangkat keras peralatan kalibrator lapang sensor tekanan udara elektronik ditunjukkan pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Blok diagram perangkat keras

Pada Gambar 3 di atas terdapat mikrokontroler untuk mengendalikan semua fungsi peralatan, garis putus-putus menandakan jalur data dan sinyal elektronik. Sedangkan jalur pipa udara pada pompa peristaltik, katup solenoid, sensor barometer standar dan sensor barometer uji dihubungkan dengan garis lurus.

C. Ketidakpastian stabilitas

Ketidakpastian stabilitas adalah faktor yang mempengaruhi hasil pengukuran pada saat proses kalibrasi yang bersumber dari sistem pembangkit tekanan.

$$U_{stabilitas} = \frac{\text{Fluktuasi max} - \text{Fluktuasi min}}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

Persamaan 2 sesuai dengan Metode Kalibrasi Tekanan Laboratorium Kalibrasi BMKG (MK/P/MET/02). Fluktuasi maksimum dan minimum pembangkit tekanan atau pengendali tekanan udara pada saat pengambilan data kalibrasi dicatat dan kemudian dihitung dengan distribusi segi-empat (rectangle distribution).

3. Hasil dan Pembahasan

Pengujian dan analisis hasil penelitian ini meliputi; 1) pengujian reaksi proses, 2) Pengaplikasian konfigurasi kontrol PID

dengan metode Ziegler-Nichols dan Åström-Hägglund, 3) Hasil pengujian kontrol PID, 4) hasil ketidakpastian stabilitas. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Kalibrasi Tekanan Udara, Pusat Instrumentasi, Kalibrasi, dan Rekayasa, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). Menggunakan barometer digital sebagai referensi standar indikator kendali dengan kondisi suhu $20 \pm 1^\circ \text{C}$, kelembapan $54 \pm 3\%$ dan tekanan $1009 \pm 1 \text{ hPa}$ pada saat dilakukan pengujian.

A. Hasil pengujian reaksi proses

Nilai reaksi proses dilakukan pada kecepatan putar motor sebesar 50% pada setpoint 925, 950, 975, 1000, 1025, dan 1050 hPa.

Tabel 2. Hasil reaksi proses open loop

Open loop			
Setpoint	L	K	T
925	1	0.49	47
950	1	0.50	42
975	1	0.49	37
1000	1	0.50	36
1025	1	0.50	37
1050	1	0.49	37
Rata-rata:	1	0.50	39.3

Berdasarkan pengujian open loop, nilai yang digunakan adalah $L=1$, $K=0,50$, dan $T=39,3$ detik. Pemodelan yang digunakan dalam system ini adalah:

$$H(s) = \frac{pv(s)}{co(s)} = \frac{39.33}{0.5s+1} e^{-2} \quad (3)$$

B. Hasil Tuning Konstanta PID

Tabel 4 berikut merupakan hasil tuning menggunakan metode Ziegler-Nichols pada set point 925 hPa sampai dengan 1050 hPa.

Tabel 4. Hasil Tuning Metode Ziegler-Nichols

Ziegler-Nichols			
Setpoint	Kp	Ti	Td
925	113.20	2	0.5
950	99.89	2	0.5

975	89.70	2	0.5
1000	85.75	2	0.5
1025	88.28	2	0.5
1050	88.93	2	0.5

Berdasarkan hasil pengujian, rata-rata dari hasil tuning dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols adalah $K_p = 94,29$, $T_i = 2$, dan $T_d = 0,5$.

Tabel 5 berikut merupakan hasil tuning menggunakan metode Åström-Hägglund.

Tabel 5. Hasil Tuning Metode Åström-Hägglund

Åström-Hägglund			
Setpoint	K_p	T_i	T_d
925	88.67	2	0.5
950	78.24	2	0.5
975	70.26	2	0.5
1000	67.17	2	0.5
1025	69.15	2	0.5
1050	69.66	2	0.5

Berdasarkan hasil pengujian, rata-rata dari hasil tuning dengan menggunakan metode Åström-Hägglund adalah $K_p = 73,86$, $T_i = 2$, dan $T_d = 0,5$.

C. Analisis sistem kendali

Performa dari sistem kendali dilihat dari waktu mencapai setpoint, overshoot dan steady state error dari sistem tanpa pengendali (On-off Control), Ziegler-Nichols, dan Åström-Hägglund.

Tabel 6. Waktu mencapai setpoint

Set point	Waktu Mencapai Setpoint (detik)		
	On-off	ZN	AH
925	35	34	36
950	33	32	32
975	32	32	32
1000	31	32	32
1025	36	36	38
1050	35	36	37

Tabel 7. Overshoot Sistem

Set point	Overshoot (hPa)		
	On-off	ZN	AH
925	-0.48	-0.35	-0.15
950	0.02	0.07	-0.1
975	-0.16	0.12	0.05

1000	0.71	0.08	0.07
1025	-0.94	0.07	0.01
1050	-0.62	0.13	-0.12

Tabel 8. Steady State error

Set point	Steady state error (hPa)		
	On-off	ZN	AH
925	0.11	-0.02	-0.08
950	-0.14	-0.01	0.01
975	0	-0.01	-0.02
1000	0.16	-0.03	0
1025	0.27	-0.03	0
1050	0.1	-0.01	-0.01

Dari hasil pengujian tabel 6, waktu untuk mencapai setpoint dari masing-masing metode tidak terdapat perbedaan yang signifikan, secara rata-rata semua metode dapat mencapai setpoint dalam waktu 34 detik. Namun, pada pengujian overshoot sistem (tabel 7) dan steady state error (tabel 8), terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara pengendali tanpa sistem kontrol dan pengendali dengan PID. Overshoot sistem tanpa pengendali mencapai nilai tertinggi hingga 0,9 hPa dan setelah mencapai kondisi stabil mengalami steady state error sebesar 0,27 hPa.

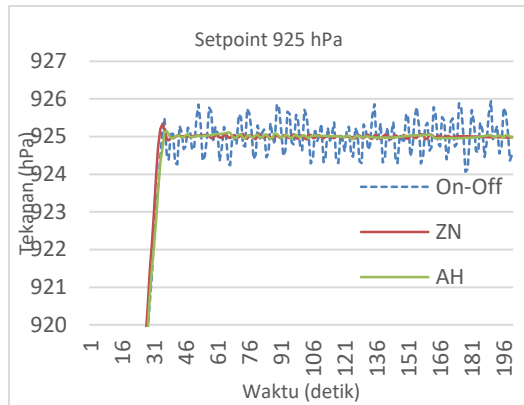
Untuk sistem pengendali PID dengan metode Ziegler-Nichols, nilai overshoot terbesar yang terjadi terpat pada setpoint 925 hPa yaitu sebesar -0,35 hPa. Sedangkan metode Åström-Hägglund hanya terjadi overshoot sebesar 0,15 hPa pada setpoint 925 hPa.

Steady state error pada tabel 8 menunjukkan pengendali PID dengan metode Ziegler-Nichols memiliki maksimum nilai error yang lebih baik yaitu -0,03 hPa.

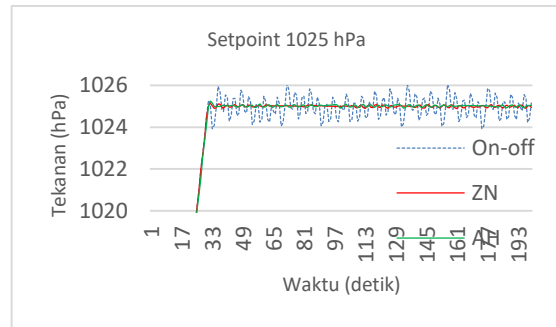
D. Analisis Ketidakpastian Stabilitas

Ketidakpastian stabilitas menggambarkan bahwa pengukuran dibatasi oleh fluktuasi nilai tekanan selama perbandingan antara sensor tekanan referensi dan alat yang dikalibrasi.

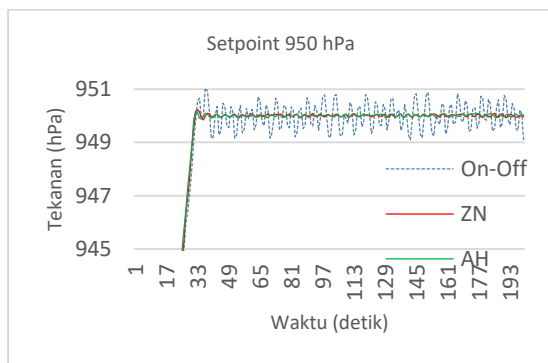
Gambar 4a hingga 4f memvisualisasikan keadaan sistem kendali pada saat pengujian di setiap setpoint dalam bentuk grafik.



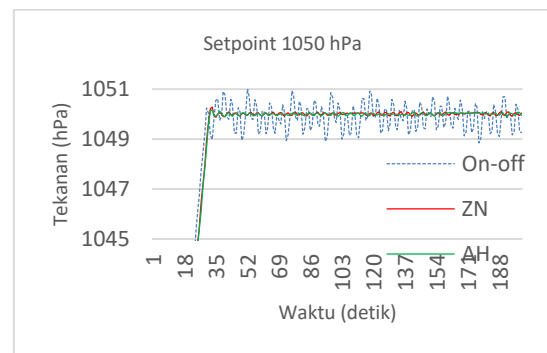
Gambar 4a. Setpoint 925 hPa



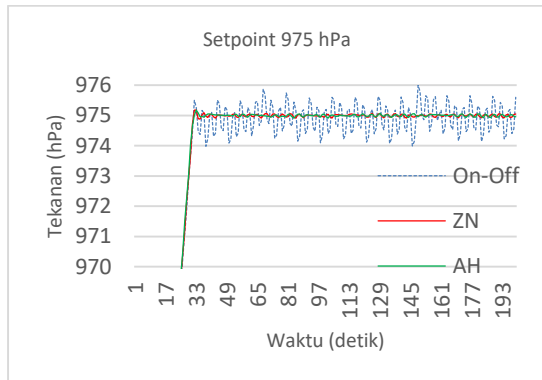
Gambar 4e. Setpoint 1025 hPa



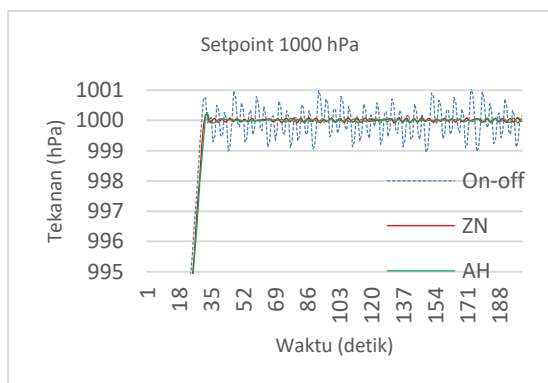
Gambar 4b. Setpoint 950 hPa



Gambar 4f. Setpoint 1050 hPa



Gambar 4c. Setpoint 975 hPa



Gambar 4d. Setpoint 1000 hPa

Dari grafik 4a hingga 4f di atas dapat terlihat tekanan tanpa sistem kendali (On-off control) sangat berfluktuasi ketika telah mencapai keadaan tunak. Sedangkan sistem kendali dengan metode Ziegler-Nichols, dan Åström-Hägglund tidak mengalami fluktuasi berlebih.

Tabel 9. Ketidakpastian baku stabilitas

Setpoint	On-off	ZN	AH
925	0.52	0.06	0.02
950	0.72	0.07	0.04
975	0.66	0.06	0.02
1000	0.77	0.01	0.01
1025	0.57	0.04	0.07
1050	0.71	0.06	0.04

Tabel 9 adalah ketidakpastian baku stabilitas yang didapat dari fluktuasi maksimum pada saat pengujian dibagi dengan distribusi segi empat atau $\sqrt{3}$. Sistem pengendali dengan metode Åström-Hägglund menunjukkan ketidakpastian baku stabilitas yang lebih kecil daripada metode Ziegler-Nichols.

4. Kesimpulan

Kalibrator tekanan udara portabel berbasis pompa peristaltik dengan pengontrol PID telah berhasil dikembangkan. Pengujian otomatisasi dengan metode Ziegler-Nichols dan Åström-Hägglund mendapatkan hasil bahwa rise time, overshoot dan steady-state error secara keseluruhan tidak terdapat perbedaan yang signifikan, namun metode tuning Ziegler-Nichols dan Åström-Hägglund mendapatkan hasil ketidakpastian stabilitas yang lebih baik daripada sistem tanpa pengendali. Hasil penelitian ini membuktikan bahwa sistem pengkondisi tekanan udara dengan pengontrol PID sangat potensial untuk dikembangkan untuk keperluan kalibrasi sensor tekanan udara dalam bidang meteorologi. Pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan penyempurnaan sistem untuk memastikan nilai U95 berada di kisaran +/- 0.1 hPa sesuai regulasi WMO.

Daftar Pustaka

Sasongko, A. (2014). Perancangan Aplikasi Rekam Data Cuaca Hasil Pengamatan Observer Stasiun Meteorologi BMKG Berbasis Website (Studi Kasus: Stasiun Meteorologi Supadio Pontianak). *Jurnal Khatulistiwa Informatika*, 2(2).

Fadholi, A. (2013). Study pengaruh suhu dan tekanan udara terhadap operasi penerbangan di bandara HAS Hananjoeddin Buluh Tumbang Belitung periode 1980-2010. *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*, 3(1), 1-10.

Goodman, C. J., & Griswold, J. D. S. (2018). Climate impacts on density altitude and aviation operations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57(3), 517-523.

Federal Aviation Administration. (2010). Weather-related aviation accident study 2003–2007.

World Meteorological Organization: 2014. Guide to meteorological instrument and observing practices.

Husband, B., Bu, M., Evans, A. G., & Melvin, T. (2004). Investigation for the operation of an integrated peristaltic micropump. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14(9), S64.

Ridwan, M., & Taryo, T. (2021). Implementation of Fuzzy Logic Controller for Pressure Sensor Calibration Chamber. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 18(2), 8825-8832.