

Kendali PID Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Berbasis ESP32 Dan Vfd

Mila Fauziyah^{1*}, Ratna Ika Putri², Supriatna Adhisuwignjo³, Wirawan⁴, Adi Candra Kusuma⁵, Dimas Rossiawan Hendra Putra⁶

^{1,2,3,4,5,6}Program Studi Sarjana Terapan Teknik Elektronika, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang
Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang, Jawa Timur, Indonesia

*Penulis Korespondensi, e-mail: mila.fauziyah@polinema.ac.id

Received:20/08/2026

Revised:28/09/2026

Accepted:30/09/2026

ABSTRAK

Mesin pencacah berpenggerak motor induksi tiga fasa mengalami penurunan kecepatan saat beban berubah, sehingga ukuran cacahan tidak seragam dan motor berisiko panas berlebih. Penelitian ini mengimplementasikan kendali kecepatan tertutup berbasis PID pada mesin pencacah rumput dan bonggol jagung milik mitra peternak di Pasuruan. Sensor *proximity* induktif memberi umpan balik kecepatan ke ESP32, sedangkan sinyal PWM dikonversi menjadi tegangan 0–10 V melalui penguat *non-inverting* untuk mengatur frekuensi *variable frequency drive* (VFD). Parameter awal dihitung dengan kurva reaksi Ziegler-Nichols ($L = 5$ s, $T = 30$ s), kemudian disetel hingga $K_p = 1,25$, $K_i = 0,25$, dan $K_d = 0,10$. Pada respons langkah 700 rpm, waktu mencapai 90% setpoint adalah 29,5 s, *overshoot* 1,29%, waktu penetapan 38 s (kriteria 2%), dan galat keadaan tunak 1,29%. Galat rata-rata sensor terhadap takometer adalah 1,44% pada kondisi berbeban.

Kata Kunci: PID, Motor induksi tiga fasa, VFD, ESP32, Sensor proximity, Mesin pencacah

ABSTRACT

A chopper driven by a three-phase induction motor loses speed when the load changes, causing non-uniform chopping and overheating risk. This study implements closed-loop PID speed control on a grass and corn cob chopper at a partner farm in Pasuruan. An inductive proximity sensor feeds speed back to an ESP32, whose PWM signal is converted to 0–10 V by a non-inverting amplifier to set the frequency of a variable frequency drive (VFD). Initial gains came from the Ziegler-Nichols reaction curve ($L = 5$ s, $T = 30$ s) and were tuned to $K_p = 1.25$, $K_i = 0.25$, and $K_d = 0.10$. In a 700 rpm step response, the system reached 90% of the setpoint in 29.5 s, with 1.29% overshoot, a 38 s settling time (2%), and 1.29% steady-state error. Sensor mean error against a tachometer was 1.44% under load.

Keywords: PID, Three-phase induction motor, VFD, ESP32, Proximity sensor, Chopper machine

1. PENDAHULUAN

Rumput gajah dan bonggol jagung adalah pakan utama ternak ruminansia kecil seperti kambing dan domba. Pakan tersebut perlu dicacah menjadi potongan yang seragam agar mudah dikonsumsi, karena ukuran yang tidak seragam membuat ternak memilih-milih pakan, memperlambat pencernaan, dan menurunkan penyerapan nutrisi [1]. Mitra penelitian ini adalah peternakan kecil di Kecamatan Purwosari, Kabupaten Pasuruan, dengan sekitar 70 ekor kambing dan domba yang membutuhkan 45–90 kg pakan per hari. Pencacahan di lokasi itu masih memakai mesin sederhana tanpa pengendali otomatis, sehingga kebutuhan mekanisasi pakan yang stabil menjadi nyata [2]. Kualitas pakan hijauan yang mudah dicerna juga menjadi perhatian pedoman pembibitan kambing dan domba [3].

Masalah utama mesin pencacah konvensional adalah kecepatan motor yang turun ketika beban bertambah. Putaran pisau menjadi tidak optimal, hasil cacahan tidak seragam, waktu proses lebih lama, dan pisau dapat macet. Benda asing seperti kayu keras atau batu juga dapat memicu arus lebih. Dalam jangka panjang kondisi ini menyebabkan motor panas berlebih, umur motor berkurang, dan biaya perawatan naik [4]. Pengaturan frekuensi secara manual melalui *variable frequency drive* (VFD) tidak cukup, sebab operator



tidak dapat menanggapi perubahan beban dalam hitungan detik. Mesin memerlukan kendali tertutup (*closed-loop*) yang mengukur kecepatan aktual dan mengoreksi frekuensi VFD secara otomatis.

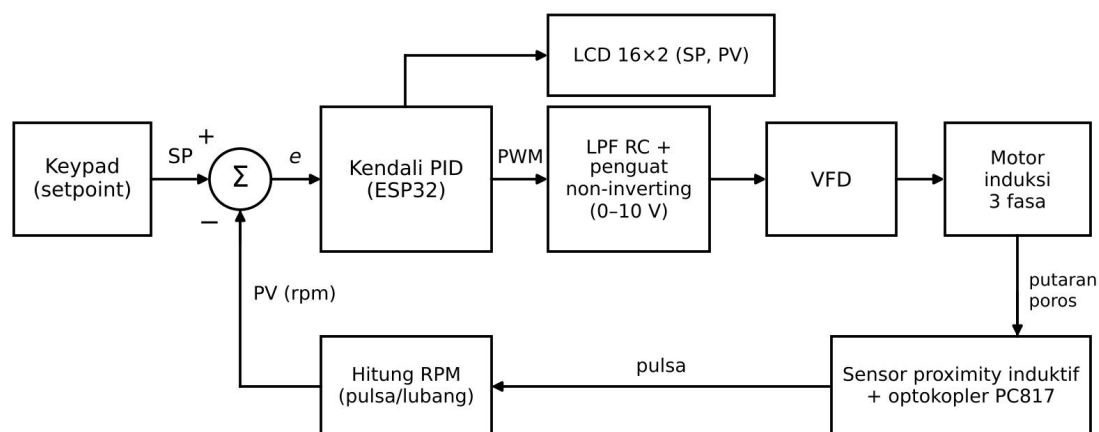
Proportional-Integral-Derivative (PID) tetap menjadi algoritma kendali yang paling banyak dipakai di industri karena strukturnya sederhana dan parameternya dapat disetel di lapangan [5], [6]. Penerapannya pada motor induksi tiga fasa dengan VFD telah dilaporkan untuk pompa *booster*, yaitu sistem ber-PID mempertahankan setpoint ketika beban berubah dan lebih andal daripada sistem tanpa PID [7]. Pengendali PID berbasis ESP32 dengan penalaan Ziegler-Nichols pada motor induksi yang digerakkan inverter mencapai waktu naik 2,85 s dan waktu penetapan 4,17 s [8], atau waktu naik rata-rata 2,2 s dengan *overshoot* 1,06% tanpa beban serta pemulihan sekitar 2 s setelah gangguan beban [9]. Penelitian lain menggunakan ESP32 dan konverter PWM ke tegangan untuk mengatur VFD, tetapi tanpa umpan balik kecepatan [10]. Studi-studi itu menggunakan motor pada pompa atau beban uji. Pada literatur yang dikaji, laporan lengkap tentang rantai ESP32, penguat 0–10 V, dan VFD pada mesin pencacah pakan dengan beban potong yang berubah-ubah belum ditemukan.

Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan kendali kecepatan motor induksi tiga fasa berbasis PID pada mesin pencacah rumput dan bonggol jagung untuk mitra tersebut. Kontribusinya adalah (i) rancangan perangkat keras yang utuh dari sensor umpan balik hingga masukan analog VFD, (ii) validasi sensor dan rangkaian pengkondisi sinyal secara terukur, dan (iii) karakteristik respons langkah sistem tertutup pada setpoint 700 rpm, dihitung langsung dari data pengujian.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Rancangan sistem

Gambar 1 menunjukkan sistem kendali tertutup yang dirancang. Operator memasukkan setpoint (SP) kecepatan melalui *keypad* matriks 4×4, dan mikrokontroler ESP32 DevKit V4 [11] menghitung galat terhadap kecepatan aktual (*process variable*, PV). Keluaran PID berupa sinyal PWM yang dikondisikan menjadi tegangan 0–10 V sebagai masukan analog VFD. VFD mengatur frekuensi dan tegangan keluaran ke motor induksi tiga fasa dengan kecepatan nominal 1500 rpm, sehingga kecepatan motor berubah sebanding dengan frekuensi [12], [13]. Sensor *proximity* induktif pada bagian yang berputar mengembalikan kecepatan aktual ke ESP32. Nilai SP dan PV ditampilkan pada LCD 16×2 berbasis I2C. Sistem juga dilengkapi tombol *start/stop* dan *emergency stop*, dan VFD dicatu 220 VAC sedangkan rangkaian kontrol dicatu 12 V DC.



Gambar 1: Diagram blok sistem kendali kecepatan tertutup



2.2 Sensor kecepatan

Sensor *proximity* induktif mendeteksi lubang pada piringan yang berputar bersama poros. Keluarannya melewati optokopler PC817 dengan LED masukan 20 mA dari catu 12 V (resistor pembatas 540 Ω) dan *pull-up* 10 k Ω ke pin D33 ESP32 agar logika tidak mengambang. ESP32 menghitung kecepatan dari jumlah pulsa pada tiap periode pencuplikan:

$$RPM = \frac{\text{pulsa}}{\text{jumlah lubang}} \times \frac{60}{\text{waktu pencuplikan (s)}} \quad (1)$$

2.3 Rangkaian pengkondisi sinyal

ESP32 membangkitkan PWM 5 kHz resolusi 10 bit (nilai 0–1023) pada pin D26. Tapis lolos rendah RC dengan $R = 10 \text{ k}\Omega$ dan $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$ (frekuensi *cut-off* 15,9 Hz) mengubah PWM menjadi tegangan rata-rata 0–3,3 V. Penguat *non-inverting* menaikkan tegangan itu ke rentang masukan VFD, 0–10 V. Penguatan yang dibutuhkan $10/3,3 \approx 3$ kali, diperoleh dari $R_{in} = 10 \text{ k}\Omega$ dan $R_f = 20 \text{ k}\Omega$:

$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_{in}} = 1 + \frac{20 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} = 3 \quad (2)$$

2.4 Perancangan kendali PID

Galat kendali adalah selisih setpoint dan kecepatan aktual, dan sinyal kendali $u(t)$ merupakan jumlah aksi proporsional, integral, dan derivatif:

$$e(t) = SP - PV(t) \quad (3)$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

Aksi proporsional mempercepat respons, aksi integral menghilangkan galat yang tersisa, dan aksi derivatif meredam perubahan galat yang cepat [13]. Parameter awal dihitung dengan metode kurva reaksi Ziegler-Nichols [14]. Sistem *open-loop* diberi langkah masukan, lalu garis singgung pada titik belok kurva respons memberikan waktu tunda L dan konstanta waktu T . Parameter PID dihitung dengan:

$$K_p = 1,2 \frac{T}{L}, T_i = 2L, T_d = 0,5L \quad (5)$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}, K_d = K_p \times T_d \quad (6)$$

Nilai hasil perhitungan dipakai sebagai acuan awal, lalu parameter disetel bertahap sambil mengamati respons kecepatan hingga diperoleh respons yang stabil.

2.5 Prosedur pengujian dan indikator kinerja

Sensor diuji dengan membandingkan pembacaan sistem terhadap takometer pada beberapa nilai PWM, tanpa beban dan berbeban, dengan galat relatif:

$$\text{Galat (\%)} = \frac{|RPM_{\text{takometer}} - RPM_{\text{sensor}}|}{RPM_{\text{takometer}}} \times 100\% \quad (7)$$

Rangkaian pengkondisi sinyal diuji dengan menaikkan nilai PWM dan mengukur tegangan pin D26 serta tegangan keluaran penguat menggunakan multimeter, lalu dibandingkan dengan tegangan hasil perhitungan ($3 \times$ tegangan pin). Respons sistem tertutup diuji dengan setpoint 700 rpm dari kondisi motor berhenti. Kecepatan dicatat setiap 1 s selama 90 s. Indikator yang dihitung dari data adalah waktu tunda,



waktu mencapai 90% setpoint (t_{90}), waktu naik 10–90% (t_r), *overshoot* (Persamaan 8), waktu penetapan (t_s) pada pita $\pm 2\%$ dan $\pm 5\%$, serta galat keadaan tunak (ϵ_{ss}) sebagai selisih setpoint dan rata-rata kecepatan pada 15 s terakhir, dalam persen setpoint. Waktu dihitung dari awal pencatatan, dengan interpolasi linear di antara dua cuplikan.

$$\%OS = \frac{y_{maks} - SP}{SP} \times 100\% \quad (8)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Validasi sensor kecepatan

Tabel 1 membandingkan pembacaan sensor dengan takometer pada pengujian berbeban. Galat berkisar 0,71–2,29% dengan rata-rata 1,44%, dan menurun ketika kecepatan naik. Pada titik 700 rpm galatnya 0,71% (698 rpm terhadap 703 rpm). Pada pengujian tanpa beban (15 titik PWM 400–900), galat berkisar 3,19–5,55% dengan rata-rata 4,31%. Sensor membaca lebih rendah daripada takometer pada semua titik uji di kedua kondisi, jadi galat tersebut bersifat sistematis dan dapat dikoreksi dengan faktor kalibrasi. Penyebab selisih antara kondisi tanpa beban dan berbeban belum dianalisis dalam penelitian ini.

TABEL I : PEMBACAAN SENSOR DAN TAKOMETER PADA PENGUJIAN BERBEBAN

PWM	Sensor (rpm)	Takometer (rpm)	Galat (%)
400	640	655	2,29
450	650	663	1,96
500	660	671	1,64
550	670	679	1,33
600	678	686	1,17
650	686	693	1,01
700	698	703	0,71
Rata-rata			1,44

Galat sekecil itu cukup untuk umpan balik pada mesin pencacah, namun selisih sistematis berarti kecepatan sebenarnya bisa sedikit berbeda dari nilai yang dikendalikan. Hal ini perlu diingat saat membaca hasil respons pada subbab 3.4.

3.2 Rangkaian pengkondisi sinyal

Tegangan keluaran naik linear terhadap nilai PWM (Tabel 2 dan Gambar 2). Regresi linear pada PWM 50–1000 memberikan kemiringan 9,66 mV per satuan PWM dengan $R^2 = 0,999998$, penguatan terukur rata-rata 3,00 kali, dan galat terhadap perhitungan rata-rata 0,16% (maksimum 0,41%). Dua titik ujung menyimpang. Pada PWM 0 keluaran 0,026 V, bukan nol, dan pada PWM 1023 keluaran jenuh di 9,68 V terhadap 9,90 V hasil perhitungan (galat 2,22%). Pada setpoint 700 rpm sistem bekerja di tengah rentang yang linear, sehingga kedua penyimpangan tersebut tidak memengaruhi hasil pengujian respons.

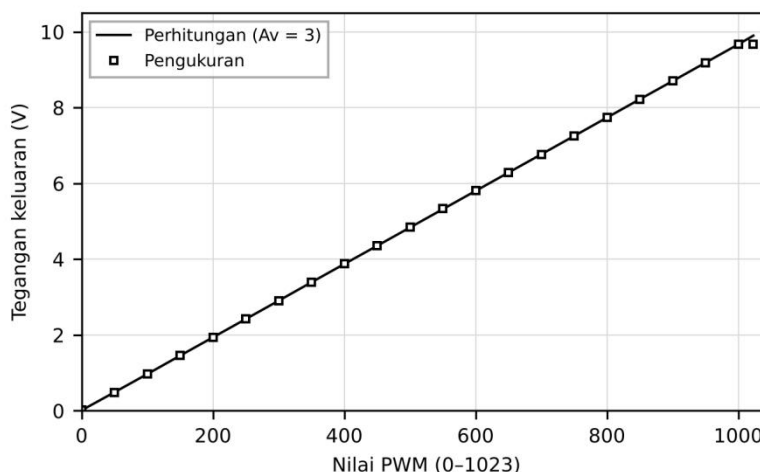
TABEL II : HASIL PENGUJIAN RANGKAIAN PENGKONDISI SINYAL (CUPLIKAN)

PWM	Tegangan pin D26 (V)	Keluaran terukur (V)	Keluaran hitung (V)	Galat (%)
100	0,323	0,973	0,969	0,41
300	0,968	2,910	2,904	0,21

p-ISSN: 2356-0533; e-ISSN: 2355-9195



PWM	Tegangan pin D26 (V)	Keluaran terukur (V)	Keluaran hitung (V)	Galat (%)
500	1,612	4,848	4,836	0,25
700	2,256	6,770	6,768	0,03
900	2,900	8,710	8,700	0,11
1000	3,223	9,670	9,669	0,01



Gambar 2: Tegangan keluaran penguat terhadap nilai PWM

3.3 Parameter PID

Kurva reaksi sistem memberikan waktu tunda $L = 5$ s dan konstanta waktu $T = 30$ s. Penerapan Persamaan (5) dan (6) menghasilkan parameter pada Tabel 3. Parameter yang dipakai pada pengujian sistem tertutup, hasil penyetelan bertahap, jauh lebih kecil daripada nilai Ziegler-Nichols: K_p sekitar 17% dan K_d kurang dari 1% nilai acuannya. Parameter yang lebih kecil membuat aksi kendali lebih lembut. Respons dengan parameter hasil penyetelan ini dibahas pada subbab berikut.

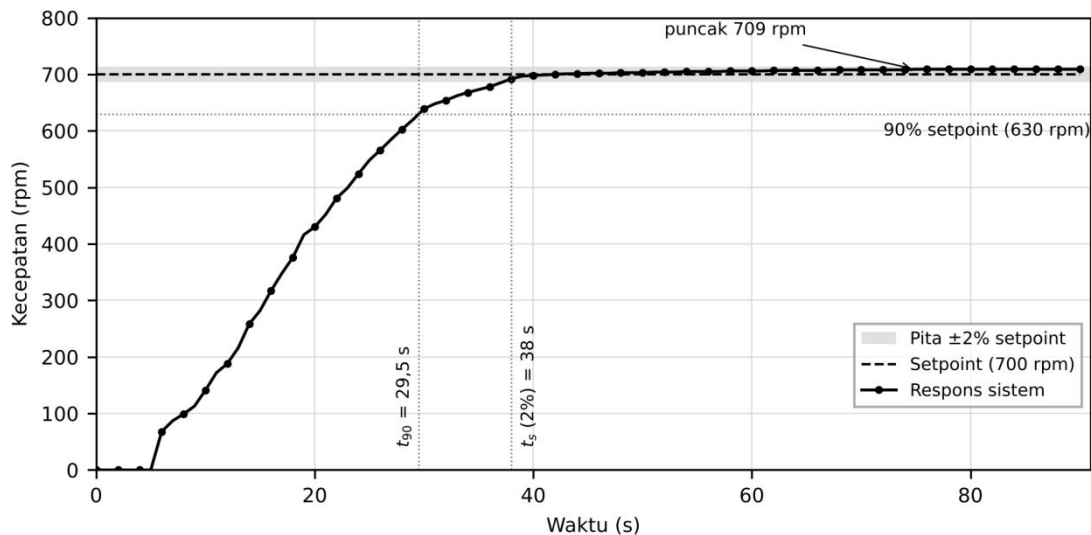
TABEL III : PARAMETER PID HASIL PERHITUNGAN DAN HASIL PENYETELAN

Parameter	Ziegler-Nichols (hitung)	Dipakai (penyetelan)
K_p	7,2	1,25
$T_i = 2L (s) / K_i$	10 / 0,72	- / 0,25
$T_d = 0,5L (s) / K_d$	2,5 / 18	- / 0,10

3.4 Respons langkah sistem tertutup

Gambar 3 menunjukkan respons kecepatan pada setpoint 700 rpm dari kondisi berhenti, dan Tabel 4 merangkum indikatornya. Kecepatan baru mulai naik pada detik ke-6, sesuai dengan waktu tunda $L = 5$ s dari kurva reaksi. Sistem mencapai 90% setpoint (630 rpm) pada 29,5 s, dan waktu naik 10–90% adalah 23,4 s. Kecepatan pertama kali menyentuh 700 rpm pada detik ke-42, lalu naik perlahan hingga 709 rpm pada detik ke-75 dan bertahan di nilai itu sampai akhir pencatatan. Respons tidak berosilasi dan tidak ada lonjakan tajam. Waktu penetapan pada pita $\pm 2\%$ adalah 38 s dan pada pita $\pm 5\%$ adalah 34 s.





Gambar 3: Respons kecepatan motor pada setpoint 700 rpm

TABEL IV : INDIKATOR KINERJA RESPONS LANGKAH (SETPOINT 700 RPM)

Indikator	Nilai	Satuan
Waktu tunda (awal kenaikan kecepatan)	6	s
Waktu mencapai 90% setpoint (t_{90})	29,5	s
Waktu naik 10–90% (t_r)	23,4	s
Kecepatan puncak	709	rpm
<i>Overshoot</i>	1,29	%
Waktu penetapan pita $\pm 2\%$	38	s
Waktu penetapan pita $\pm 5\%$	34	s
Kecepatan keadaan tunak (rata-rata 15 s terakhir)	709	rpm
Galat keadaan tunak (ϵ_{ss})	1,29 (9 rpm)	%

Waktu t_{90} sebesar 29,5 s hampir sama dengan konstanta waktu $T = 30$ s pada kurva reaksi *open-loop*, jadi sistem tertutup belum lebih cepat daripada plantnya sendiri. Hal ini wajar mengingat K_p yang dipakai hanya 17% dari nilai Ziegler-Nichols. Sistem ini jauh lebih lambat daripada pengendali PID berbasis ESP32 pada penelitian lain yang mencapai waktu naik 2–3 s [8], [9], tetapi mesin pencacah tidak memerlukan respons secepat itu karena motor dijalankan sekali lalu dijaga pada kecepatan kerja. Penyebab perbedaan kecepatan respons belum dipisahkan, misalnya antara inersia pisau dan *pulley* serta pengaturan percepatan di VFD. Penelitian lain dengan ESP32 dan PID menunjukkan *overshoot* 4,24% pada motor DC kursi roda dengan parameter hasil Ziegler-Nichols [15], jadi *overshoot* 1,29% pada penelitian ini termasuk kecil.

Galat keadaan tunak 1,29% berarti kecepatan yang terbaca tetap 9 rpm di atas setpoint sampai detik ke-90. Dengan aksi integral, galat semacam ini seharusnya terus dikoreksi ke nol. Karena itu penyebabnya perlu ditelusuri lebih lanjut, misalnya melalui faktor kalibrasi sensor atau resolusi keluaran PWM, dan hasil ini belum dapat dikatakan membuktikan bahwa aksi integral menghilangkan galat. Kontribusi tiap aksi (P, I, dan D) juga belum dapat dipisahkan, sebab pengujian hanya dilakukan dengan satu set parameter.



3.5 Keterbatasan

Pertama, respons langkah diuji satu kali dan belum diulang, sehingga sebaran hasil belum diketahui. Kedua, motor tidak diberi gangguan beban terukur selama pengujian PID, jadi kemampuan menjaga setpoint saat bahan pakan masuk, yang menjadi motivasi penelitian ini, belum terbukti secara kuantitatif. Ketiga, belum ada pembandingan berupa respons tanpa PID dengan kondisi yang sama. Keempat, keseragaman ukuran cacahan dengan dan tanpa PID belum diukur. Kelima, sensor membaca lebih rendah daripada takometer sehingga kecepatan sebenarnya dapat berbeda dari nilai terkendali.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kendali PID berbasis ESP32, sensor *proximity* induktif, penguat *non-inverting* 0–10 V, dan VFD berhasil diimplementasikan pada mesin pencacah rumput dan bonggol jagung. Sensor kecepatan memiliki galat rata-rata 1,44% terhadap takometer pada kondisi berbeban dan rangkaian pengkondisi sinyal linear dengan galat rata-rata 0,16%. Dengan $K_p = 1,25$, $K_i = 0,25$, dan $K_d = 0,10$, respons langkah pada setpoint 700 rpm mencapai 90% setpoint dalam 29,5 s, dengan *overshoot* 1,29%, waktu penetapan 38 s ($\pm 2\%$), dan galat keadaan tunak 1,29%. Respons tersebut stabil dan tidak berosilasi, tetapi lambat dan masih menyisakan selisih tetap 9 rpm di atas setpoint.

Pengujian ke depan perlu mengukur gangguan beban dengan bahan pakan sungguhan, membandingkannya dengan kondisi tanpa PID, dan mengukur keseragaman ukuran cacahan. Peneliti juga perlu menelusuri penyebab galat keadaan tunak, mengulang pengujian untuk menilai sebaran hasil, mengoreksi selisih sensor dengan kalibrasi atau mengganti sensor dengan *encoder*, dan menguji sistematis variasi parameter PID.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada P3M Politeknik Negeri Malang atas pendanaan kegiatan pengabdian kepada masyarakat serta kepada mitra peternak di Kecamatan Purwosari, Kabupaten Pasuruan, atas dukungan dan kerja samanya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Sudrajat and S. Handayani, "Efisiensi mekanisasi pakan ternak dan pengaruh ukuran cacahan hijauan terhadap performa ruminansia," *Jurnal Teknologi Pangan dan Pertanian*, vol. 3, no. 1, pp. 34–41, 2020.
- [2] B. Santoso *et al.*, "Pemberdayaan peternakan ruminansia kecil melalui digitalisasi dan mekanisasi pakan di Kabupaten Pasuruan," *Jurnal Pengabdian dan Pemberdayaan Masyarakat*, vol. 8, no. 1, pp. 45–53, 2024.
- [3] Kementerian Pertanian Republik Indonesia, *Peraturan Menteri Pertanian Nomor 102/Permentan/OT.140/7/2014 tentang Pedoman Pembibitan Kambing dan Domba yang Baik (Good Breeding Practices)*. Jakarta, Indonesia, 2014.
- [4] A. Prastiyo and B. Utomo, "Analisis kegagalan mekanis dan overcurrent akibat overload pada mesin penggiling bahan organik," *Jurnal Teknik Elektro dan Sistem Kendali*, vol. 5, no. 2, pp. 78–85, 2023.
- [5] K. J. Åström and T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, 2nd ed. Research Triangle Park, NC, USA: Instrument Society of America, 1995.
- [6] K. H. Ang, G. Chong, and Y. Li, "PID control system analysis, design, and technology," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 13, no. 4, pp. 559–576, 2005.
- [7] W. S. Pambudi, D. Widyantoro, Y. A. Prabowo, M. Munir, and N. P. U. Putra, "Analisa pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa dengan variable frequency drive menggunakan kontrol PID pada pompa booster," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan (JITET)*, vol. 14, no. 1, 2026, doi: 10.23960/jitet.v14i1.8375.
- [8] P. Kakham, C. Mongkhon, J. Pinthong, and S. Suchaipron, "Development of PI and PID controllers based on ESP32 for speed control of a three-phase induction motor using an inverter with a Kalman filter," *Industrial Technology and Engineering Journal*, vol. 7, no. 3, 2025.
- [9] C. R. Harahap, F. X. A. Setyawan, and C. A. Salsabila, "IoT based induction motor PID speed control system using Ziegler-Nichols method," *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 20, no. 4, pp. 1069–1088, 2025.



- [10] S. Buwarda, Mutmainnah, and M. F. Yakob, "Design and development of a three-phase induction motor speed control system using Altivar 61 based on temperature sensor and Internet of Things (IoT)," *Jurnal Teknologi Elekterika*, vol. 22, no. 2, pp. 60–64, 2025.
- [11] Espressif Systems, "ESP32 series datasheet." [Online].
Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- [12] B. K. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drives*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2002.
- [13] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2010.
- [14] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers," *Transactions of the ASME*, vol. 64, pp. 759–768, 1942.
- [15] B. M. D. H. Budiharto, M. Fauziyah, and D. Radianto, "Pengendalian kecepatan motor DC berbasis mikrokontroler pada kursi roda elektrik," *Journal of Mechanical and Electrical Technology (METROTECH)*, vol. 4, no. 1, 2025.

