

Sistem Kendali PID untuk Pengendalian Kecepatan Motor Penggerak *Unmanned Ground Vehicle* untuk Aplikasi Industri Pertanian

Widagdo Purbowaskito^{1*}, Chung-Hao Hsu²

¹Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Atma Jaya Yogyakarta
¹Jl. Babarsari No. 43, Yogyakarta 55281, Indonesia

²School of Manufacturing Systems and Mechanical Engineering, Sirindhorn International Institute of
²Technology, Thammasat University, Pathumthani 12120, Thailand

*Email korespondensi: widagdo_purbowaskito@staff.uajy.ac.id

Dikirim 19 Juni 2017, Direvisi 02 Agustus 2017, Diterima 07 September 2017

Abstrak – Saat ini, penelitian terhadap penggunaan UGV dalam bidang industri pertanian dilakukan secara intensif. UGV dapat diaplikasikan dalam bidang industri pertanian dikarenakan operasinya yang fleksibel dan bentuknya yang sesuai dengan kondisi pada lahan pertanian. Salah satu faktor penting dalam pengoperasian UGV di lahan pertanian adalah pengendalian kecepatan geraknya. Kecepatan gerak UGV secara langsung ditentukan oleh kecepatan sudut dari motor DC yang digunakan sebagai tenaga penggerak pada roda-roda UGV. Artikel ini akan mendeskripsikan mengenai perancangan sistem kendali untuk mengendalikan kecepatan motor DC penggerak pada roda UGV. Pengendalian UGV ini dirancang menggunakan sistem kendali PID dimana berdasarkan metode trial dan eror dihasilkan nilai gain persamaan PID sebagai berikut $K_P = 0.03$, $K_I = 0.0000001$, dan $K_D = 0.005$. Kecepatan UGV pada penelitian ini diuji dengan menggunakan dua input perintah kecepatan sudut dalam pemrogramannya. Berdasarkan pengujian sistem kendali menggunakan input 5500 RPM dan 4500 RPM diperoleh hasil bahwa UGV dapat bergerak pada jalur lurus dengan kecepatan yang konstan dengan nilai 0.528 m/s dan 0.431 m/s. Input perintah pada program berupa nilai RPM pada persamaan sistem kendali menghasilkan pengendalian motor DC yang tepat dibandingkan input program berupa nilai PWM secara langsung untuk mengoperasikan motor DC.

Kata kunci – UGV, kecepatan, sistem kendali, motor DC

Abstract – Nowadays, researches on the UGV usage for agricultural industry are done intensively. UGVs can be applied in agricultural industry sector due to its flexible operation and its suitable shape for agricultural field conditions. An important factor in the UGV operation on agricultural field is the controlling of UGV motion velocity. Directly, the UGV motion velocity is determined by the angular velocity of the DC motors used as the UGV propulsion motor on its wheels. This paper aims to describe the control system design for controlling the UGV propulsion DC motor speed. The UGV control is designed by using the PID control system where based on the trial and error method the PID gains are obtained as follows, $K_P = 0.03$, $K_I = 0.0000001$, and $K_D = 0.005$. The UGV velocity is tested by using two input commands on its programming as the angular velocity. Based on the control system testing with two input commands of 5500 RPM and 4500 RPM, it is obtained that UGV can move on a straight path with constant velocity at 0.528 m/s and 0.431 m/s. The input commands on the UGV programing in RPM values on the designed control system resulting in the proper DC motor speed controller compare to the input commands in PWM values directly to operate the DC motor.

Keywords – UGV, velocity, control system, DC motor

I. PENDAHULUAN

Pertanian merupakan salah satu sektor penting yang mendukung kehidupan manusia selama ribuan tahun. Pertambahan jumlah manusia memberikan pengaruh pada meningkatnya jumlah permintaan bahan pangan dan membuat para petani untuk meningkatkan jumlah persediaan produknya. Oleh karena itu, pertanian telah berubah menjadi sebuah bio-industri modern berskala besar yang meliputi produksi tanaman, bahan pangan, peternakan, dan biomassa [1]. Implementasi robotika menjadi suatu hal yang cukup menjanjikan dalam meningkatkan produktivitas pertanian [2]. Namun penerapan teknologi robotika dan otomasi dalam bidang industri pertanian harus mempertimbangkan faktor-faktor yang ada terutama dari segi penilaian ekonomis [3]. Penggunaan teknologi robotika dalam bidang industri pertanian memiliki potensi adalah penggunaan *unmanned ground vehicle* (UGV) dan *unmanned aerial vehicle* (UAV).

Namun aplikasi UGV dalam bidang pertanian memiliki cakupan yang luas dikarenakan kemampuannya yang tidak hanya dibatasi pada aplikasi *remote sensing* seperti UAV. Penggunaan UGV pada kegiatan *crop scouting* memungkinkan untuk pengamatan pertumbuhan tanaman lebih teliti dan rinci untuk setiap tanaman di lahan [4]. Pada kegiatan pengendalian hama dan penyakit tanaman, penyemprotan pestisida dapat dilakukan secara terkendali oleh operator pada jarak yang aman menggunakan UGV sehingga operator tidak terekspos oleh zat kimia yang berbahaya pada cairan pestisida [5]. Pengendalian gulma yang tumbuh di lahan pertanian dapat dilakukan secara mekanis menggunakan UGV sehingga dapat mengurangi penggunaan zat kimia untuk pengendalian gulma [6]. UGV dapat digunakan untuk membantu petani dalam proses pemanenan sebagai alat transportasi saat petani memanen buah sehingga beban panen yang dibawa oleh petani bisa lebih besar [7]. Selain pada lahan pertanian secara umum, UGV dapat diaplikasikan pada kegiatan peternakan yaitu sebagai pengumpul telur ayam secara otomatis [8].

Sebuah UGV dirancang seperti pada Gambar 1 untuk dapat diaplikasikan pada lahan pertanian dengan kemampuan pergerakan *holonomic* atau *omnidirectional* yang tidak dimiliki oleh UGV yang terdapat pada literatur yang diulas. Pergerakan *holonomic* merupakan pergerakan suatu sistem *mobile* ke segala arah tanpa perlu merubah orientasinya, sedangkan pada UGV yang diulas merupakan UGV dengan sistem pergerakan *non-holonomic* seperti kendaraan dan alat berat pada umumnya.

Lahan pertanian dimana UGV akan diaplikasikan merupakan suatu medan kerja dengan jenis permukaan yang tidak rata dan seragam serta memiliki lingkungan yang tidak terstruktur yang cukup berbeda dengan permukaan pabrik maupun jalan raya. Sehingga

pergerakan suatu UGV memerlukan pengendalian agar dapat bergerak secara leluasa dan lancar pada lahan pertanian yang tidak terstruktur. Sistem kendali diperlukan untuk mengendalikan kecepatan sudut dari motor DC yang digunakan sebagai tenaga penggerak dari UGV yang dirancang agar dapat bergerak secara konstan pada lahan pertanian. Pengendalian motor penggerak UGV ini ditujukan agar UGV dapat bergerak dengan kecepatan yang diinginkan agar operasi UGV dapat bekerja dengan baik.



Gambar 1. Unmanned Ground Vehicle yang Dirancang Untuk Aplikasi Pada Bidang Industri Pertanian

Proses perancangan sistem kendali untuk kecepatan sudut motor yang digunakan sebagai tenaga penggerak UGV dirancang menggunakan sistem kendali *Proportional-Integral-Derivative* (PID). Sistem kendali PID merupakan sebuah sistem kendali tertutup (*closed-loop*) dimana digunakan suatu umpan balik (*feedback*) berupa tingkat kesalahan suatu variabel proses dimana tingkat kesalahan ini kemudian dikalikan dengan gain-gain proporsional, integral, dan derivatif untuk menghasilkan output yang sesuai dengan nilai variabel proses yang kita inginkan.

Sistem kendali PID telah diterapkan dalam beberapa aplikasi pada industri termasuk juga pada aplikasi robotika. Sistem kendali PID dapat diaplikasikan pada pengendalian robot *line follower*, dimana PID digunakan untuk mengoreksi dan mengendalikan posisi robot agar tidak keluar dari jalur yang ditentukan dan tetap mengikuti jalur tersebut [9]. Keseimbangan suatu robot *humanoid* dapat dikendalikan dengan menggunakan sistem kendali PID dengan menggunakan sensor *accelerometer* sebagai pendeteksi keseimbangan robot pada sumbu X dan Y. Sistem kendali PID digunakan untuk mengendalikan keseimbangan robot *humanoid* dalam melakukan gerakan untuk tarian [10]. Pemodelan pengendalian sebuah quadcopter menggunakan sistem kendali PID dilakukan sebagai dasar acuan dan model untuk penelitian quadcopter dikarenakan kestabilan dari pengendalian menggunakan PID [11].

Penerapan sistem kendali PID juga telah diterapkan untuk pengendalian UGV yang beroperasi di lahan pertanian dengan penerapan secara pemodelan sistem dan simulasi [12] dan [13]. Dalam penelitian-penelitian tersebut penerapan sistem kendali hanya dilakukan sebatas pada tahap simulasi, dan belum melakukan implementasi penerapan sistem kendali

UGV secara *hardware*. Sistem kendali PID yang digunakan untuk mengendalikan putaran motor pada UGV untuk lahan pertanian pada [14] hanya diperlihatkan secara konsep pengendalian PID dan tidak diperlihatkan mengenai hasil dari pengendalian, nilai gain-gain yang diperoleh, serta kecepatan UGV yang dikendalikan. Baik implementasi secara simulasi maupun implementasi pada *hardware* tidak dijelaskan dan dideskripsikan.

Pengoperasian motor DC pada UGV untuk lahan pertanian memerlukan pengendalian yang berbeda dengan aplikasi pada *mobile robot* untuk aplikasi permukaan indoor yang rata. Pada umumnya pengoperasian motor DC pada *mobile robot* dilakukan dengan memberikan perintah input pada program secara langsung menggunakan nilai *Pulse Width Modulation* (PWM). Pemberian input berupa nilai PWM untuk mengoperasikan motor DC pada UGV lahan pertanian tidak sesuai dikarenakan putaran motor DC akan UGV terganggu oleh permukaan lahan pertanian yang tidak rata dan tidak seragam, sehingga kecepatannya dapat berubah dan pergerakannya menjadi terganggu. Sehingga dalam penelitian ini penerapan sistem kendali PID dilakukan dengan tujuan untuk mengendalikan kecepatan sudut dari motor DC yang digunakan sebagai tenaga penggerak dari UGV menggunakan perintah input berupa nilai RPM yang diinginkan bukan menggunakan nilai PWM. Sehingga diharapkan bahwa permukaan lahan pertanian yang tidak rata dan tidak seragam tidak mengganggu kecepatan UGV saat bergerak. Hasil dari pengendalian menggunakan sistem kendali PID ini berupa kecepatan UGV yang bergerak pada jalur lurus.

II. METODE PENELITIAN

A. Instrumen Penelitian

Pada penelitian perancangan sistem kendali ini digunakan sebuah robot UGV sebagai bahan utama penelitian ini seperti pada gambar 1. Robot UGV yang digunakan terdiri dari sistem mekanis robot, sistem elektronika, dan sistem penggerak atau aktuator. Sistem mekanis robot terdiri dari komponen-komponen rangka penyusun robot, sistem transmisi, sistem gerak roda, dan sistem suspensi. Sistem elektronika robot terdiri dari mikrokontroler, *driver* motor DC, dan sensor *rotary encoder*. Sedangkan aktuator dari robot terdiri dari motor DC untuk menggerakkan robot dan mengemudikan robot.

Salah satu instrumen utama pada penelitian ini adalah sensor *rotary encoder* yang merupakan instrumen yang digunakan untuk mengakusisi data kecepatan dari motor DC yang akan dikendalikan. Gambar 2 merupakan gambar dari sensor *rotary encoder* yang digunakan dalam penelitian ini. Sensor ini merupakan sensor *encoder* magnetik kuadratur yang diproduksi oleh Pololu. Penginderaan nilai kecepatan sudut motor DC menggunakan sensor *encoder* ini dilakukan menggunakan persamaan,

$$RPM_{(aktual)} = (N \times f \times 60) / CPR \quad (1)$$

dimana RPM = kecepatan sudut motor DC (rpm), N = nilai hitungan *encoder* dalam satu periode, f = nilai frekuensi sinyal output *encoder* dalam satu periode, dan CPR = nilai *count per revolution encoder* dimana pada *encoder* magnetik Pololu ini memiliki spesifikasi yaitu 64 CPR.



Gambar 2. *Magnetic Rotary Encoder* Sebagai Sensor Untuk Menghitung Kecepatan Sudut Motor DC

Motor DC merupakan aktuator yang operasinya dikendalikan oleh PWM. Kecepatan sudut motor DC ditentukan oleh nilai PWM yang bernilai antara 0 sampai 255. Dimana nilai PWM ini ditentukan oleh duty cycle yang bernilai 0% untuk PWM 0 dan 100% untuk PWM 255 dengan nilai frekuensi dan periode yang tetap.

B. Persamaan Sistem Kendali

Sistem kendali PID pada penelitian ini bekerja dengan mengukur perbedaan nilai antara kecepatan sudut motor DC aktual dengan nilai referensinya dan memberikan koreksi kepada sistem agar menghasilkan nilai aktual sama atau mendekati nilai referensi dan mempertahankan nilai error mendekati nol. Pada penelitian ini kecepatan aktual motor DC adalah *process variable* (PV) dan nilai kecepatan referensi adalah *set point* (SP). Perbedaan nilai antara kecepatan aktual dan kecepatan referensi merupakan error yang kemudian diaplikasikan pada gain proporsional, integral, dan derivatif untuk menghasilkan sinyal kendali motor DC.

Gambar 3 merupakan diagram blok diagram sistem kendali PID dan Gambar 4 merupakan *controller architecture* dari UGV pada penelitian ini. Nilai kecepatan aktual dari motor DC diukur menggunakan sensor *rotary encoder* dan menjadi input umpan balik untuk sistem kendali. Kemudian sistem kendali akan menghasilkan keluaran berupa nilai PWM yang akan digunakan oleh *driver* motor DC untuk mengendalikan kecepatan sudut motor DC.

Seperti yang telah dideskripsikan bahwa motor DC dioperasikan menggunakan nilai PWM maka persamaan PID yang digunakan dalam sistem kendali yang dirancang yaitu,

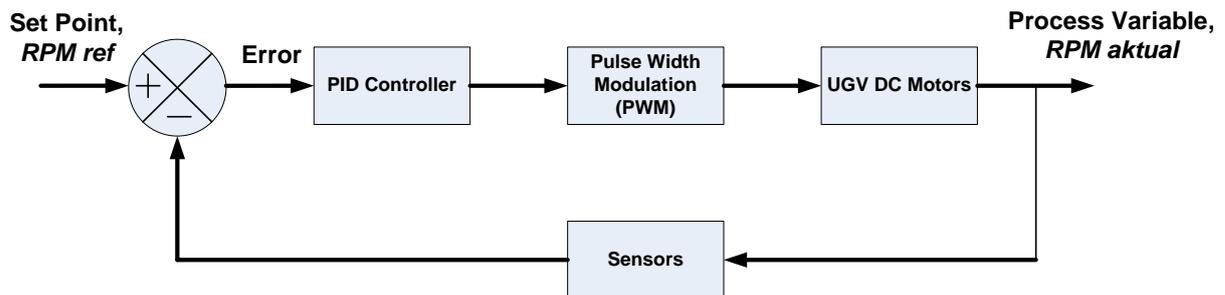
$$PWM_{(t)} = K_P e + K_I \int e \, dT + K_D de/dT + PWM_{(t-1)} \quad (2)$$

dengan persamaan nilai error,

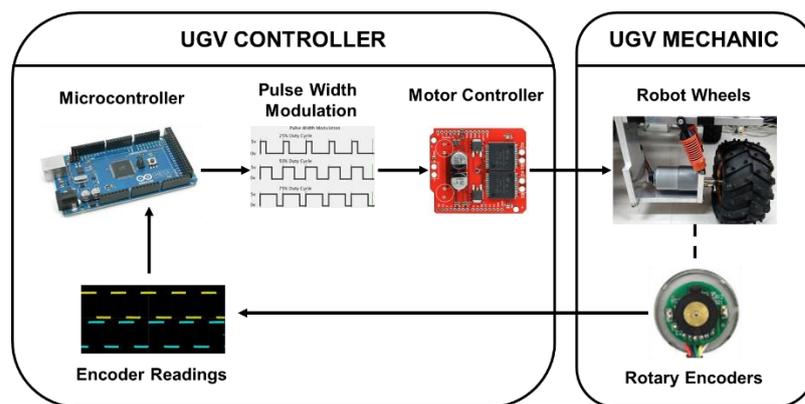
$$e = RPM_{(ref)} - RPM_{(aktual)} \quad (3)$$

dimana $PWM(t)$ = output nilai PWM untuk mengendalikan kecepatan motor DC (*process variable*), K_P = gain proporsional, K_I = gain intergral, K_D = gain derivatif, T = periode pengukuran waktu putaran motor oleh encoder, $PWM(t-1)$ = nilai PWM

yang dikalkulasi persamaan PID satu stage sebelum $PWM(t)$, e = merupakan selisih nilai antara kecepatan sudut motor DC referensi (*set point*) ($RPM(ref)$) dengan nilai aktualnya ($RPM(aktual)$).



Gambar 3. Blok Diagram Sistem Kendali PID



Gambar 4. Controller Architecture dari UGV yang Dirancang

Nilai kecepatan sudut berupa RPM akan dapat dikonversi menjadi nilai kecepatan linier roda UGV menggunakan rumus,

$$v = (r \times 2\pi \times RPM \times GR)/60 \quad (4)$$

dimana v = kecepatan linier roda UGV (m/s), r = jari-jari roda UGV (0.12 m), RPM = kecepatan sudut yang terbaca *encoder*, GR = rasio *gear* transmisi motor DC. Nilai kecepatan linier masing-masing roda ini akan menjadi nilai kecepatan dari UGV.

III. HASIL PENELITIAN

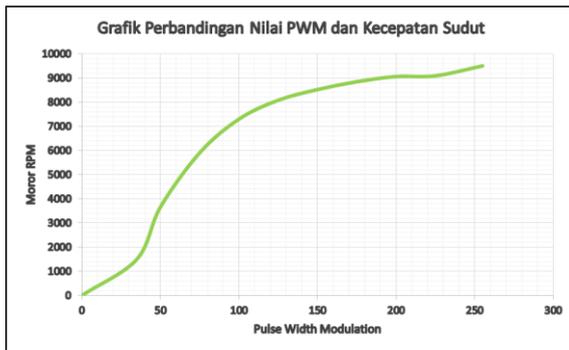
A. Perbandingan Nilai PWM dan RPM

Motor DC yang digunakan sebagai tenaga penggerak robot dalam penelitian ini berjumlah 4 buah. Motor DC Pololu yang digunakan memiliki spesifikasi kecepatan maksimum sebesar 10000 rpm dengan sistem transmisi rasio gear 1:131. Motor DC merupakan sistem dinamis elektro-mekanis yang berarti motor DC bukan sistem linier, sehingga sinyal PWM mengendalikan motor DC secara tidak linier. Gambar 5 merupakan contoh grafik perbandingan nilai kecepatan motor DC dengan input nilai PWM. Grafik pada Gambar 5 tersebut menunjukkan bahwa nilai RPM meningkat seiring meningkatnya nilai PWM namun tidak dalam grafik yang linier sehingga sulit untuk menentukan nilai kecepatan sudut motor DC

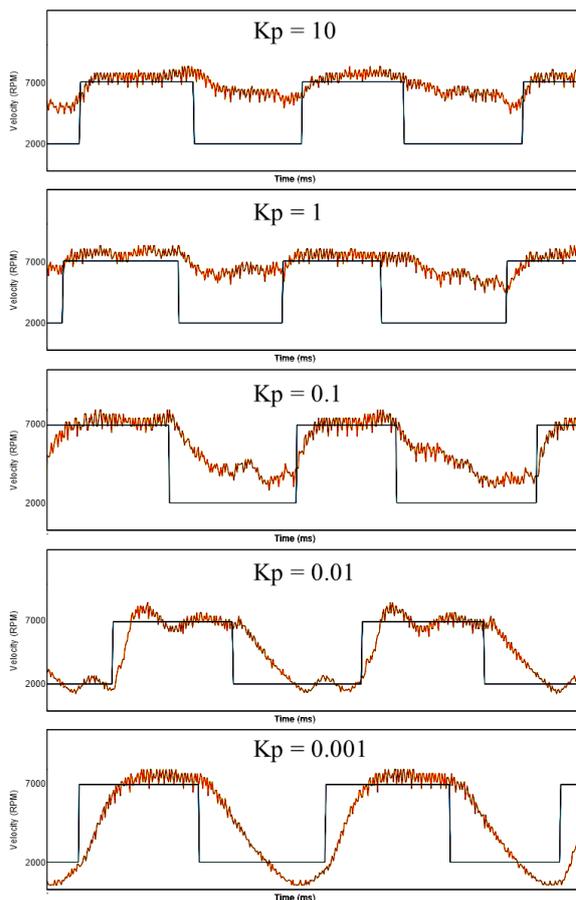
yang tepat dalam RPM menggunakan input nilai PWM. Sehingga penentuan kecepatan UGV pada program menggunakan input nilai PWM secara langsung tidak disarankan.

B. Proses Penentuan Gain

Menggunakan Sistem kendali kecepatan motor DC, penentuan nilai kecepatan motor DC yang tepat dapat dilakukan tanpa memberikan input perintah nilai PWM. Berdasarkan persamaan (2) dan (3) input perintah untuk menggerakkan motor DC dapat diberikan dalam bentuk input nilai RPM. Dimana sistem kendali akan memproses input tersebut dan menghasilkan nilai PWM yang sesuai untuk menggerakkan motor pada kecepatan yang diinginkan. Untuk keberhasilan hasil pemrosesan oleh sistem kendali PID diperlukan nilai gain proporsional (K_P), intergal (K_I), dan derivatif (K_D) yang sesuai. Pada penelitian ini penentuan nilai ketiga gain tersebut dilakukan dengan metode trial dan error. Metode *trial error* merupakan metode manual pemberian nilai gain dengan memperhatikan hasil dari nilai gain yang diberikan.



Gambar 5. Perbandingan Nilai PWM dan Kecepatan Motor DC yang Dihasilkan

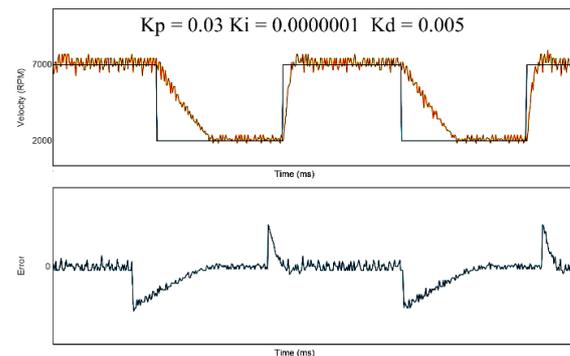


Gambar 6. Grafik Proses Tuning Gain Proporsional Sistem Kendali yang Dirancang

Proses penentuan nilai gain sistem kendali dilakukan dengan menentukan nilai gain proporsional terlebih dahulu. Pada Gambar 6 merupakan contoh penentuan nilai gain proporsional pada penelitian ini. Penentuan nilai K_P dimulai dari nilai random yaitu $K_P = 10$. Seperti pada gambar nilai $K_P = 10$, kecepatan sudut motor DC belum dapat dikontrol, hal ini dikarenakan nilai K_P terlalu tinggi sehingga perlu dikurangi. Untuk nilai $K_P = 1$ kecepatan motor DC juga belum dapat dikontrol seperti pada nilai K_P sebelumnya. Respon kecepatan motor DC saat $K_P = 0.1$ lebih baik. Nilai $K_P = 0.01$ menunjukkan hasil yang mulai sesuai dengan nilai *set point*-nya namun masih terdapat *overshoot* dan *undershoot* pada grafik kecepatan sudutnya. Pada saat nilai $K_P = 0.001$ respon

kecepatan motor DC menunjukkan osilasi dengan *overshoot* dan *undershoot* yang lebih tinggi dibandingkan nilai K_P yang sebelumnya.

Nilai gain proporsional, integral, dan derivatif yang berhasil diperoleh menggunakan metode *trial-error* adalah $K_P = 0.03$, $K_I = 0.0000001$, dan $K_D = 0.005$. Hasil pengendalian kecepatan motor DC menggunakan nilai gain-gain tersebut ditunjukkan pada Gambar 7. Pada Gambar 7 terlihat bahwa kecepatan dari motor DC dapat dikendalikan sesuai RPM referensi, dimana tidak terdapat *overshoot* maupun *undershoot* pada grafik kecepatannya dan perbedaan nilai antara RPM referensi dan RPM aktual dapat dipertahankan 0. Nilai gain ini digunakan untuk keempat motor penggerak UGV dikarenakan keempat motor yang digunakan memiliki spesifikasi yang sama.

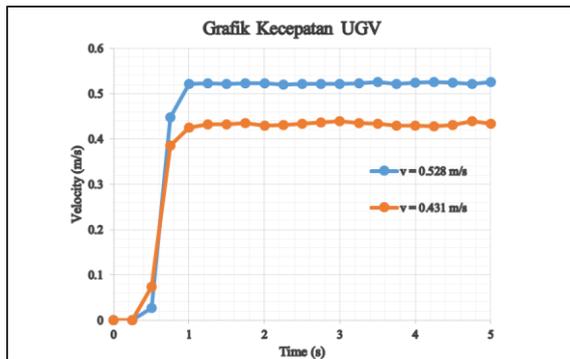


Gambar 7. Hasil Pengendalian Kecepatan Sudut Motor DC Menggunakan Ketiga Nilai Gain yang Telah Diperoleh

C. Hasil Pengendalian Kecepatan Motor UGV

Berdasarkan hasil penentuan nilai-nilai ketiga gain sistem kendali kecepatan sudut dari motor DC yang digunakan kecepatan gerak UGV diuji dengan memberikan nilai input perintah kepada sistem kendali untuk menggerakkan motor penggerak untuk berputar pada kecepatan sudut yang diinginkan. Pengujian dilakukan dengan memberikan input nilai kecepatan sudut kemudian diperoleh data kecepatan sudut aktual dari keempat *rotary encoder*. Data ini kemudian diolah menggunakan persamaan (4). Hasilnya berupa kecepatan linier roda UGV yang digunakan sebagai nilai kecepatan dari UGV.

Pada penelitian ini digunakan dua input perintah kecepatan sudut motor DC yaitu 5500 RPM dan 4500 RPM. Dimana dengan input nilai kecepatan sudut ini UGV bergerak lurus. Gambar 8 merupakan pengukuran kecepatan UGV dengan kedua input kecepatan sudut motor dc. Input kecepatan sudut motor DC 5500 RPM menghasilkan kecepatan UGV sebesar 0.528 m/s dan input kecepatan sudut UGV menghasilkan kecepatan UGV sebesar 0.431 m/s. Grafik pada Gambar 8 tersebut juga diperoleh informasi bahwa sistem kendali yang dirancang dapat mengendalikan UGV pada kecepatan yang konstan.



Gambar 8. Grafik Pengukuran Kecepatan UGV

IV. PENUTUP

A. Kesimpulan

Sistem kendali untuk mengendalikan kecepatan sudut motor DC pada roda penggerak UGV telah dirancang menggunakan sistem kendali PID. Menggunakan metode trial dan eror nilai-nilai gain pada sistem kendali PID telah ditentukan dengan hasil $K_P = 0.03$, $K_I = 0.0000001$, dan $K_D = 0.005$. Nilai-nilai gain tersebut berhasil mengendalikan kecepatan sudut roda penggerak UGV sesuai dengan yang diinginkan, dimana tidak terdapat *overshoot* maupun *undershoot* pada grafik kecepatannya. Nilai-nilai tersebut digunakan seragam pada keempat motor DC yang digunakan sebagai penggerak dikarenakan spesifikasi yang sama. Hasil pengendalian kecepatan sudut motor DC pada roda UGV menghasilkan kecepatan yang konstan pada UGV saat bergerak dalam *track* lurus. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa input berupa nilai RPM pada programing untuk menggerakkan motor DC lebih sesuai daripada input berupa nilai PWM karena akan lebih mudah untuk menentukan kecepatan sudutnya sesuai dengan yang diinginkan.

B. Saran

Untuk penelitian selanjutnya disarankan penentuan nilai ketiga gain PID untuk menggunakan metode lain selain trial dan eror agar hasil gain yang diperoleh lebih tepat. Dan untuk setiap motor DC perlu dilakukan penentuan gainnya masing-masing karena meskipun spesifikasi keempat motor sama namun motor DC adalah sistem dinamis yang memiliki karakteristik tersendiri. Selain itu perancangan sistem kendali motor DC menggunakan metode kendali lainnya juga perlu dilakukan untuk memperoleh informasi metode pengendalian yang paling sesuai.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kepada Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University, Thailand atas dana untuk melakukan penelitian ini melalui beasiswa *Graduate Scholarship*

for Excellent Foreign Students yang diterima oleh penulis pertama.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Grift, Q. Zhang, N. Kondo, and K. Ting, "A review of automation and robotics for the bio-industry," *J. Biomechatronics Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 37–54, 2008.
- [2] S. M. Pedersen, S. Fountas, and S. Blackmore, "Agricultural Robots – Applications and Economic Perspectives," *Service Robot Appl.*, p. 400, 2008.
- [3] A. A. Dijkhuizen, R. B. M. Huirne, S. B. Harsh, and R. W. Gardner, "Economics of robot application," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 17, no. 1, pp. 111–121, 1997.
- [4] U. Weiss and P. Biber, "Plant detection and mapping for agricultural robots using a 3D LIDAR sensor," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 59, no. 5, pp. 265–273, 2011.
- [5] G. Adamides *et al.*, "HRI usability evaluation of interaction modes for a teleoperated agricultural robotic sprayer," *Appl. Ergon.*, vol. 62, pp. 237–246, 2017.
- [6] H. Y. Jeon and L. F. Tian, "Direct application end effector for a precise weed control robot," *Biosyst. Eng.*, vol. 104, no. 4, pp. 458–464, 2009.
- [7] W. Jang, G. Lewis, and J. Hoachuck, "Vibration-reducing Path Tracking Control for a Strawberry Transport Robot," 2014, vol. 7004.
- [8] B. A. Vroegindewei, G. L. van Willigenburg, P. W. G. Groot Koerkamp, and E. J. van Henten, "Path planning for the autonomous collection of eggs on floors," *Biosyst. Eng.*, vol. 121, pp. 186–199, 2014.
- [9] K. Joni, M. Ulum, and Z. Abidin, "Robot Line Follower Berbasis Kendali Proportional- Integral-Derivative (PID) Untuk Lintasan Dengan Sudut Ekstrim," *J. Infotel*, vol. 8, no. 2, pp. 138–142, 2016.
- [10] P. J. Iswara and A. E. Putra, "Sistem Kontrol Keseimbangan Statis Robot Humanoid Joko Klana Berbasis Pengontrol PID," *Indones. J. Electron. Instrum. Syst.*, vol. 2, no. 1, pp. 67–76, 2012.
- [11] A. Dharmawan, Y. Y. Simanungkalit, and N. Y. Megawati, "Pemodelan Sistem Kendali PID pada Quadcopter dengan Metode Euler Lagrange," *Indones. J. Electron. Instrum. Syst.*, vol. 4, no. 1, pp. 13–24, 2014.
- [12] C. S. Gohiya, S. S. Sadistap, S. A. Akbar, and B. A. Botre, "Design and development of digital PID controller for DC motor drive system using embedded platform for mobile robot," in *2013 IEEE 3rd International Advance Computing Conference (IACC)*, 2012, pp. 52–55.
- [13] A. Haytham, A. Wassal, Y. Z. Elhalwagy, and N. M. Darwish, "Modeling and simulation of four-wheel steering unmanned ground vehicles using a PID controller," in *2014 International Conference on Engineering and Technology (ICET)*, 2014.
- [14] N. K. Barhate and K. S. Ingle, "Farm Monitoring Mobile Robot Speed Controlled of DC Motor Driver System Using PID Controller .," *Int. J. Eng. Comput. Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 9950–9953, 2015.