PERANCANGAN MEKANISME SUCTION PADA ROBOT PEMBERSIH KACA GEDUNG BERTINGKAT

Sebastian Edric Ardo
Program Studi S1 Teknik Elektro,
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
sebastianardo@student.telkomuniversity.ac.id

Dr. Ir. Sony Sumaryo M.T.
S1 Teknik Elektro,
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
sonysumaryo@telkomuniversity.ac.id

Dr. Basuki Rahmat, S.T., M.T.
S1 Teknik Elektro,
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
basukir@telkomuniversity.ac.id

***Abstrak* — Pembersihan kaca pada gedung bertingkat menghadirkan tantangan keselamatan dan efisiensi yang signifikan. Untuk menjawab permasalahan tersebut, penelitian ini merancang prototipe robot pembersih kaca dengan mekanisme adhesi berbasis thrust-suction menggunakan motor Electric Ducted Fan (EDF). Sistem ini memanfaatkan kombinasi gaya dorong dan tekanan negatif untuk mempertahankan posisi robot pada permukaan vertikal. Pengaturan daya adhesi dilakukan secara real-time menggunakan kontroler PID berbasis ESP32-WROOM-32 dan sensor arus PZEM-017 sebagai feedback utama. Mobilitas robot didukung oleh sistem roda rantai yang memungkinkan pergerakan pada permukaan kaca vertikal. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mencapai kestabilan adhesi yang berhasil menopang beban vertikal maksimum seberat 2700 gram. Sistem kontrol PID menunjukkan rise time rata-rata dibawah 4 detik namun menghasilkan overshoot yang signifikan hingga 17.34% pada setpoint arus tinggi (45 A), mengindikasikan adanya karakteristik non-linear. Secara efisiensi, sistem dengan kontrol PID terbukti beroperasi 5.7°C lebih dingin dibandingkan kontrol manual saat menahan beban maksimum, menunjukkan adanya peningkatan efisiensi termal sebesar 14.6%.**

***Kata kunci*— robot pembersih kaca, thrust-suction, motor edf, kontrol pid, gedung bertingkat**

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi robotika telah membuka peluang penerapan solusi yang lebih aman dan efisien untuk pembersihan kaca gedung bertingkat, yang secara tradisional memiliki risiko keselamatan kerja yang tinggi. Beberapa solusi komersial telah tersedia, seperti robot dari Shenxi Machinery Group yang menggunakan sistem vakum murni. Namun, pendekatan ini bergantung pada segel presisi yang rentan terhadap kebocoran, sehingga mengurangi keandalannya dalam jangka panjang. Sebagai alternatif, mekanisme adhesi thrust-suction berbasis Electric Ducted Fan (EDF) menawarkan solusi yang lebih adaptif dan fleksibel. Mekanisme ini menggabungkan gaya dorong dari aliran udara berkecepatan tinggi dengan tekanan negatif di antara selubung motor dan permukaan kaca, sehingga tidak sepenuhnya bergantung pada segel kedap udara. Meskipun demikian, pendekatan ini menuntut sistem kontrol yang presisi untuk mengatasi fluktuasi daya adhesi akibat variasi permukaan, kebocoran udara, dan perubahan beban. Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan merancang prototipe robot pembersih kaca berbasis thrust-suction dengan motor EDF yang efektif dan terjangkau, serta mengimplementasikan algoritma kendali PID berbasis umpan balik sensor arus guna menjaga daya adhesi secara stabil selama pengoperasian di permukaan vertikal.

II. KAJIAN TEORI

A. Metode Adhesi pada Permukaan Kaca

Berbagai metode adhesi telah dikembangkan untuk memungkinkan robot bergerak di permukaan vertikal, khususnya pada bidang kaca, dengan mempertimbangkan efisiensi, fleksibilitas, dan faktor keselamatan. Adhesi magnetik menggunakan elektromagnet dan efektif pada permukaan feromagnetik, namun tidak dapat digunakan pada kaca kecuali dengan sistem hibrida yang kompleks. Adhesi tekanan negatif menciptakan gaya hisap menggunakan pompa atau kipas, namun metode ini sangat bergantung pada kualitas segel dan rentan terhadap kebocoran pada permukaan yang tidak rata.

Adhesi elektrostatik memanfaatkan medan listrik untuk menciptakan gaya tarik elektrostatik antara permukaan robot dan kaca. Metode ini memiliki konsumsi energi yang rendah, tetapi performanya dapat menurun akibat kelembapan dan kontaminan pada permukaan. Metode adhesi bio-inspiratif, seperti yang meniru struktur mikro pada kaki tokek, menawarkan pendekatan tanpa konsumsi daya, tetapi umumnya memiliki kapasitas beban terbatas dan memerlukan proses fabrikasi yang kompleks.

Sementara itu, adhesi thrust murni menggunakan propeler atau kipas untuk menekan robot ke permukaan. Metode ini sangat fleksibel karena tidak tergantung pada jenis permukaan, tetapi cenderung boros energi karena memerlukan gaya dorong konstan selama operasi.

B. Metode Adhesi pada Permukaan Kaca

Metode thrust-suction merupakan pendekatan hibrida yang menggabungkan thrust dari aktuator seperti Electric Ducted Fan (EDF) dengan tekanan negatif yang terbentuk di antara aktuator dan permukaan kaca. Saat EDF diarahkan langsung ke permukaan, aliran udara berkecepatan tinggi menghasilkan gaya dorong ke arah permukaan sekaligus menciptakan zona bertekanan rendah akibat efek hisap. Kombinasi dari dua gaya ini memungkinkan terbentuknya gaya adhesi yang cukup kuat untuk menopang robot tanpa memerlukan segel udara presisi.
Studi sebelumnya menunjukkan bahwa besarnya total gaya adhesi sangat dipengaruhi oleh jarak antara ujung EDF dan permukaan kaca. Terdapat jarak optimal yang memaksimalkan efek hisap dan dorong secara bersamaan. Keunggulan sistem ini terletak pada kemampuannya untuk beradaptasi dengan variasi bentuk permukaan, namun membutuhkan pengaturan yang presisi agar gaya adhesi tetap stabil selama pergerakan robot.

C. Metode Adhesi pada Permukaan Kaca

Untuk menjaga agar daya adhesi tetap stabil di berbagai kondisi operasi, diperlukan sistem pengendalian umpan balik yang andal. Salah satu metode yang umum digunakan adalah kontroler Proportional-Integral-Derivative (PID). Pengendali PID bekerja berdasarkan tiga komponen utama, yaitu:

- Proportional (K_p): merespons besar error saat ini (selisih antara setpoint dan nilai aktual),
- Integral (K_i,): menjumlahkan error dari waktu ke waktu untuk menghilangkan error steady-state,
- Derivative (K_d): memprediksi arah dan kecepatan perubahan error untuk mengurangi overshoot dan meningkatkan stabilitas sistem.

Persamaan umum PID dapat dituliskan sebagai:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)\,dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \qquad (1)$$

di mana $u(t)$ adalah sinyal kendali yang dihasilkan, dan $e(t)$ adalah error atau selisih antara nilai yang diinginkan (setpoint) dan nilai aktual dari sistem.

Penentuan nilai parameter K_p, K_i, dan K_d atau yang dikenal sebagai proses tuning, sangat krusial terhadap performa sistem. Salah satu metode tuning yang umum digunakan adalah metode Ziegler-Nichols, yang melibatkan pencarian nilai kritis gain dan periode osilasi untuk menghasilkan respons sistem yang cepat namun tetap stabil. Penggunaan PID pada sistem thrust-suction sangat tepat karena mampu menstabilkan gaya adhesi meskipun terjadi fluktuasi beban atau variasi jarak antara robot dan permukaan.

III. METODE

Penelitian ini dilakukan melalui tiga tahapan utama, yaitu studi literatur, perancangan sistem, serta implementasi dan pengujian. Studi literatur dilakukan untuk mengkaji berbagai metode adhesi dan sistem kontrol yang relevan dengan kebutuhan robot pembersih kaca. Tahap selanjutnya adalah perancangan sistem yang berpusat pada arsitektur berbasis mikrokontroler ESP32-WROOM-32. Sistem ini menggunakan sensor arus PZEM-017 sebagai masukan utama untuk mengukur konsumsi arus pada motor Electric Ducted Fan (EDF) secara real-time, yang berfungsi sebagai umpan balik (feedback) dalam sistem kendali adhesi.

Data sensor diproses oleh mikrokontroler menggunakan algoritma kontrol Proportional-Integral-Derivative (PID) untuk menghasilkan sinyal kendali menuju dua aktuator utama. Sistem adhesi menggunakan motor EDF brushless berdiameter 70 mm yang dikendalikan oleh Electronic Speed Controller (ESC) 80A untuk menghasilkan gaya thrust-suction. Sistem mobilitas terdiri dari dua motor DC 12V high-torque dengan gearbox, yang menggerakkan roda rantai melalui motor driver L298N. Seluruh sistem mendapatkan suplai daya dari baterai Lithium Polymer (Li-Po) berkapasitas tinggi.

Prototipe fisik dibangun berdasarkan rancangan perangkat keras tersebut. Sebelum integrasi sistem dilakukan, sensor arus PZEM-017 dikalibrasi terlebih dahulu dengan membandingkan hasil pembacaan terhadap wattmeter sebagai referensi. Selanjutnya, dilakukan karakterisasi motor EDF untuk memetakan hubungan antara input throttle, konsumsi arus, dan thrust yang dihasilkan pada berbagai jarak dari permukaan kaca. Parameter pengendali PID ditentukan melalui metode osilasi berkelanjutan Ziegler-Nichols untuk mendapatkan nilai K_p, K_i, dan K_d yang optimal.

Pengujian kinerja sistem dilakukan dengan memberikan tiga level setpoint arus (rendah, sedang, dan tinggi) untuk menganalisis respons sistem melalui parameter rise time, overshoot, settling time, dan steady-state error. Validasi akhir dilakukan dengan mengukur beban maksimum yang dapat ditopang robot secara vertikal, serta membandingkan efisiensi termal sistem kendali PID terhadap kontrol manual.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Gambar

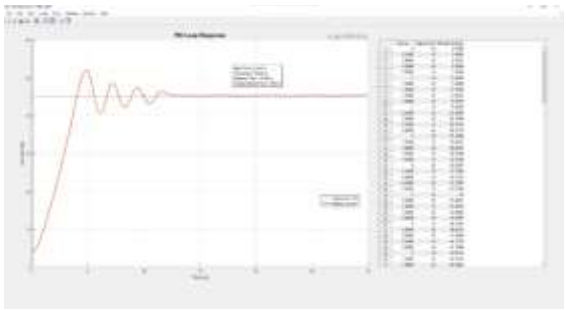
Hasil kalibrasi sensor arus PZEM-017 menunjukkan akurasi tinggi dengan rata-rata error keseluruhan sebesar 0,63% dibandingkan alat ukur referensi. Karakterisasi motor Electric Ducted Fan (EDF) mengungkapkan bahwa hubungan antara input throttle, konsumsi arus, dan thrust bersifat non-linear (cenderung eksponensial). Jarak optimal antara EDF dan permukaan kaca untuk menghasilkan gaya thrust maksimum ditemukan sebesar 2,5 cm.

Setelah proses tuning PID menggunakan metode Ziegler-Nichols, dilakukan pengujian sistem pada tiga level setpoint arus untuk mengevaluasi respons dinamik sistem. Hasil pengujian dirangkum pada Tabel 1 berikut:

TABEL 1
(A)

Setpoint Arus	Rise Time (s)	Overshoot (%)	Settling Time (s)
5 A (Rendah)	0,92	2,26	2,11
20 A (Sedang)	2,85	13,68	11,22
45 A (Tinggi)	3,61	17,34	12,22

Uji validasi akhir menunjukkan bahwa prototipe mampu menopang beban maksimum sebesar 2700 gram secara stabil, dan beban puncak 2950 gram sesaat sebelum kehilangan adhesi. Perbandingan suhu motor menunjukkan bahwa kontrol PID menghasilkan suhu 5,7°C lebih rendah dibandingkan kontrol manual setelah diuji dengan beban maksimum selama 30 detik.



GAMBAR 1
(A)

B. Pembahasan

Analisis performa sistem menunjukkan bahwa algoritma kontrol PID yang digunakan mampu memberikan respons cepat dengan rise time kurang dari 4 detik, bahkan pada beban tinggi. Namun, sistem cenderung agresif dengan nilai overshoot yang tinggi, terutama pada setpoint sedang dan tinggi (>15%). Overshoot ini berpotensi menurunkan kestabilan sistem dan meningkatkan risiko tergelincirnya robot pada permukaan kaca.

Keunggulan kontrol PID terlihat pada efisiensi termal, di mana suhu motor lebih rendah dibandingkan saat kontrol manual. Hal ini menunjukkan bahwa PID mampu mengatur output secara optimal untuk mempertahankan daya adhesi, sehingga mengurangi pemborosan daya dalam bentuk panas.

Keterbatasan utama sistem bukan terletak pada metode kontrol, melainkan pada kemampuan fisik motor EDF. Penggunaan arus sebagai satu-satunya feedback juga dinilai kurang representatif terhadap gaya adhesi aktual, karena fluktuasi kecil akibat ketidakteraturan permukaan kaca tidak selalu memengaruhi arus secara signifikan.

Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan menambahkan sensor tekanan pada ruang adhesi untuk memperkuat akurasi feedback. Mengingat karakteristik sistem yang non-linear, eksplorasi metode kontrol adaptif seperti Fuzzy-PID juga direkomendasikan untuk meredam overshoot dan meningkatkan kestabilan

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan merealisasikan arsitektur perangkat keras yang fungsional untuk prototipe robot pembersih kaca berbasis mekanisme adhesi thrust-suction menggunakan motor Electric Ducted Fan (EDF), yang mampu menopang beban vertikal hingga 2700 gram. Sistem kendali Proportional-Integral-Derivative (PID) yang diimplementasikan pada mikrokontroler ESP32 dengan sensor arus sebagai umpan balik terbukti mampu mengatur daya adhesi secara responsif, dengan waktu pencapaian setpoint kurang dari 4 detik. Namun, respons cepat ini disertai penurunan stabilitas pada setpoint menengah hingga tinggi, sebagaimana terlihat dari nilai overshoot yang cukup besar dan waktu stabilisasi yang lebih panjang. Meskipun kapasitas beban puncak tidak melebihi kontrol manual, sistem PID menunjukkan keunggulan dalam efisiensi termal, ditunjukkan oleh suhu operasional akhir yang lebih rendah. Secara keseluruhan, tujuan penelitian untuk mengembangkan mekanisme adhesi thrust-suction dengan kendali tertutup telah tercapai, dan hasil yang diperoleh menjadi dasar yang kuat bagi pengembangan sistem yang lebih adaptif dan akurat di masa mendatang.

REFERENSI

[1] Jiang, H. (2024). Design of a New Glass Cleaning Robot. Journal of Theory and Practice of Engineering Science, 4(01), 28–33. https://doi.org/10.53469/jtpes.2023.04(01).04

[2] Liu, W., Chen, J., Fei, Y., Hu, Z., Yu, C., & Gao, W. (2024). A Design Study on Commercial Cleaning Robots Based on Kano–QFD. Sustainability (Switzerland), 16(20). https://doi.org/10.3390/su16208935

[3] Muthugala, M. A. V. J., Vega-Heredia, M., Mohan, R. E., & Vishaal, S. R. (2020). Design and control of awall cleaning robot with adhesion-awareness. Symmetry, 12(1). https://doi.org/10.3390/SYM12010122

[4] Zhu, J., Zhu, Y., & Zhang, P. (2024). Review of advancements in wall climbing robot techniques. Franklin Open, 8, 100148. https://doi.org/10.1016/j.fraope.2024.100148

[5] Vega-Heredia, M., Mohan, R. E., Wen, T. Y., 'Aisyah, J. S., Vengadesh, A., Ghanta, S., & Vinu, S. (2019). Design and modelling of a modular window cleaning robot. Automation in Construction, 103, 268–278. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.025

[6] 2017 25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED) : MED 2017 : July 3-6, 2017, University of Malta, Valletta Campus, Malta. (2017). IEEE.

[7] Liang, P., Gao, X., Zhang, Q., Gao, R., Li, M., Xu, Y., & Zhu, W. (2021). Design and stability analysis of a wall-climbing robot using propulsive force of propeller. Symmetry, 13(1), 1–12. https://doi.org/10.3390/sym13010037

[8] IEEE ICMA 2008 : proceedings of 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation : August 5-8, 2008, Takamatsu, Japan. (2008). IEEE.

[9] Bozic, M., Jerbic, B., & Svaco, M. (2021). Development of a Mobile Wall-Climbing Robot with a Hybrid Adhesion System. 2021 44th International Convention on Information, Communication and Electronic Technology, MIPRO 2021 - Proceedings, 1136–1142. https://doi.org/10.23919/MIPRO52101.2021.9596717

[10] Jona, A., & Alkamachi, A. (2024). Design, Modeling and PID Control of a Cable-Driven Wall Climbing Robot Using Genetic Algorithms. Journal Europeen Des Systemes Automatises, 57(6), 1677–1685. https://doi.org/10.18280/jesa.570615

[11] Shenxi Machinery Group. (n.d.). *Wall Cleaning Robot*. Retrieved May 21, 2025, from https://www.shenxi.com/plist/wall-cleaning-robot

[12] International Code Council. (2015). International Building Code 2015 (Chapter 9, Section 902.1). Retrieved May 21, 2025, from https://codes.iccsafe.org/s/IEBC2015/chapter-9-alterations-level-3/IEBC2015-Ch09-Sec902

[13] Zhang, H., Wu, J., An, Y., Xie, P., & Cui, D. (2024). Research on Trajectory-Tracking Control System of Tracked Wall-Climbing Robots. Sensors, 24(1). https://doi.org/10.3390/s24010144

[14] Nguyen, V. T., Nguyen, N. K., Nguyen, C. C., & Bui, N. T. (2021). A Study of Wall-Climbing Robot for Cleaning Silo Using Vacuum Principle. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 10(7), 368–373. https://doi.org/10.18178/ijmerr.10.7.368-373

[15] Zulkifli, R., Husain, A. R., Ibrahim, I. S., Mazni, M., & Fauzan, N. H. A. M. (2022). Analysis of the Hybrid Adhesion Mechanism of the Wall Climbing Robot. Lecture Notes in Electrical Engineering, 921 LNEE, 155–169. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3923-5_14

[16] Cao, K., Qin, G., Zhou, J., Xu, J., Xu, L., & Ji, A. (2024). Design and experimental research of a rolling-adsorption wall-climbing robot. Industrial Robot, 51(2), 258–268. https://doi.org/10.1108/IR-08-2023-0194

[17] Rajendran, R., & Arockia Dhanraj, J. (2023). A comparative survey on weight & payload of wall climbing robot (WCR) using magnetic adhesive, suction adhesive and fusion type adhesive. Materials Today: Proceedings. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.002