

DESAIN PENGENDALI LOGIKA FUZZY TIPE TAKAGI-SUGENO-KANG UNTUK MENGATUR KECEPATAN GERAK MOBILE ROBOT

Asep Najmurrokhman, Kusnandar, Bambang HSR Wibowo,
Muhammad Haries Ridho Amarullah

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Jenderal Achmad Yani
Jl. Terusan Jend. Sudirman PO Box Cimahi 40533
E-mail : asepnajmurrokhman@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Mobile robot adalah sebuah tipe robot yang dapat bergerak bebas karena dilengkapi elemen gerak seperti roda atau kaki. Makalah ini menguraikan tentang perancangan pengendali gerak *mobile robot* tipe beroda berbasis prinsip logika fuzzy. Sistem inferensi fuzzy yang digunakan dalam desain pengendaliannya menggunakan pendekatan Takagi-Sugeno-Kang. Tujuan pengendaliannya adalah pergerakan robot yang efektif dan penghindaran rintangan. Untuk merealisasikan tujuan pengendalian tersebut, dua variabel input dan satu variabel output serta sebuah basis aturan yang menghubungkan input outputnya dibangun untuk menghasilkan pergerakan *mobile robot* yang efektif. Variabel inputnya terdiri dari jarak antara robot dengan penghalang serta selisihnya sedangkan variabel outputnya berupa kecepatan gerak robot. Masing-masing variabel input dan output terdiri dari tiga himpunan fuzzy dengan bentuk fungsi keanggotaan berupa segitiga. Data input diperoleh dengan menggunakan sensor ultrasonik HC-SR04. Pengendali logika fuzzy direalisasikan dengan menggunakan mikrokontroler Arduino Mega2560. Hasil pengujian menunjukkan robot dapat bergerak maju, berbelok kiri kanan, dan menghindari rintangan serta mampu menyesuaikan kecepatan geraknya sesuai dengan jarak antara robot dan penghalang.

Kata kunci: logika fuzzy, mikrokontroler Arduino, robot beroda, sensor HC-SR04, Takagi-Sugeno-Kang

Abstract

Mobile robot is a class of autonomous robot that can move freely because it is equipped with motion elements such as wheels or legs. This paper describes the design of fuzzy logic controller for a wheeled mobile robot by implementing Takagi-Sugeno-Kang inference system. The objective of this design is to render an effective motion of robot and obstacle avoidance as well. To realize the control objective, two input variables, one output variable and a rule base that connects the input and output are built to produce an effective mobile robot movement. The input variable consists of the distance between the robot and the obstacle and its error as well, while the output variable is the robot's motion speed. Each input and output variable consists of three fuzzy sets with the triangle membership function respectively. Input data is obtained using HC-SR04 ultrasonic sensor. Fuzzy logic controller is realized using Arduino Mega2560 microcontroller. The experimental results show the robot can move forward, turn left right, and avoid obstacles and be able to adjust the speed of motion according to the distance between the robot and the obstacle.

Keywords : fuzzy logic, Arduino microcontroller, a wheeled mobile robot, sensor HC-SR04, Takagi-Sugeno-Kang

PENDAHULUAN

Mobile robot adalah tipe robot yang dapat bergerak bebas menggunakan kaki atau

roda (Najmurrokhman, Wibowo and Rafanca, 2017). Para peneliti bidang *mobile robot* terus berupaya mengembangkan *mobile robot* yang

dapat menangani beberapa tugas yang berkaitan dengan kehidupan manusia, seperti manajemen pergudangan, penanganan produk di ruang penyimpanan, pekerjaan di area berbahaya, dan sebagainya (Faisal *et al.*, 2018). Sebuah *mobile robot* dirancang dapat bergerak menyusuri lintasan atau jalan dengan bentuk tertentu. Salahsatu tujuan pengendaliannya adalah menjaga jarak antara robot dengan penghalang sehingga robot tidak menabrak penghalang. Kemampuan tersebut dikenal sebagai *obstacle avoidance* (penghindaran rintangan). Untuk memenuhi kemampuan tersebut, sebuah sensor yang dapat mendeteksi jarak robot dan penghalang harus dipasang agar pengendali dapat menghitung dan menetapkan sinyal kendali yang sesuai untuk dikirimkan ke bagian aktuator robot. Dalam menjalankan misi tersebut, pergerakan robot dapat dibuat tetap atau berubah. Jika robot diatur bergerak dengan laju konstan, maka pengendaliannya relatif mudah. Sementara itu, jika parameter waktu gerak robot dilibatkan dalam desain pengendali maka laju gerak robot harus dibuat bervariasi sesuai dengan jarak antara robot dengan penghalang. Robot harus diatur agar pergerakannya mirip saat berkendara di jalan. Saat jarak antara robot dengan penghalang sangat jauh, laju pergerakannya sangat cepat. Lajunya kemudian menurun seiring dengan jarak ke penghalang semakin dekat. Mekanisme pengendalian seperti itu dapat direalisasikan dengan teknik kendali tertentu yang diinstalasi dalam pengendalinya.

Makalah ini menguraikan tentang perancangan pengendali gerak *mobile robot* tipe beroda berbasis prinsip logika fuzzy. Dengan prinsip ini, variabel proses baik input yang diolah maupun outputnya dinyatakan dengan himpunan fuzzy. Himpunan fuzzy memuat deklarasi linguistik dari variabel proses yang disertai dengan derajat keanggotaan dari setiap anggota himpunan tersebut. Misalnya variabel input untuk pengendalian laju gerak *mobile robot* ini adalah jarak antara robot dengan penghalang, himpunan fuzzy yang dapat dibuat untuk menyatakan variabel input ini adalah sangat dekat, dekat, jauh, sangat jauh dan sebagainya. Sementara itu, himpunan fuzzy yang dapat dibuat untuk variabel output misalnya lambat, cepat, sangat cepat, dan sebagainya. Dengan

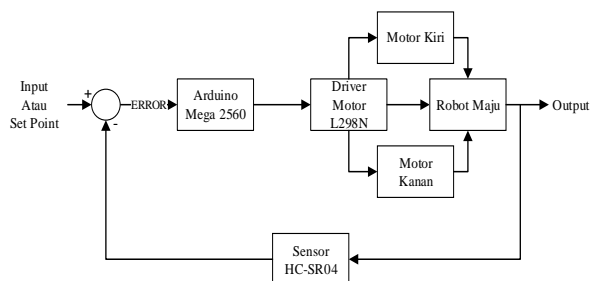
mengadopsi prinsip logika fuzzy ini, pergerakan robot menjadi lebih alamiah karena menyesuaikan dengan jarak antara robot tersebut dengan penghalang. Tujuan pengendaliannya menjadi lebih efektif dan mungkin menghemat sumber daya yang digunakan. Prinsip logika fuzzy ini digunakan oleh Peng & Shi (2018) dalam menentukan fungsi ketidakpastian yang muncul dalam desain pengendali adaptif untuk *mobile robot* (Peng and Shi, 2018), sedangkan Bobyr dkk. (2016) menggunakannya dalam desain pengendali untuk *mobile robot* tertentu sehingga menghasilkan akurasi dan mengurangi waktu yang diperlukan untuk perubahan parameternya (Bobyr, Yakushev and Milostnaya, 2016). Sementara itu, Wardoyo dkk. (2015) menggunakan teknik fuzzy untuk mengoptimasi gerak *mobile robot* yang memiliki kemampuan *self balancing* (Wardoyo *et al.*, 2015).

Dalam praktiknya, penerapan prinsip logika fuzzy dalam desain sistem memerlukan tiga tahap meliputi fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi. Fuzzifikasi adalah proses perubahan data nyata ke dalam himpunan fuzzy, sedangkan inferensi adalah pengambilan keputusan dengan cara tertentu. Sementara itu, defuzzifikasi mengembalikan nilai fuzzy ke dalam nilai nyatanya. Teknik inferensi berupa cara pengambilan keputusan berbasis pengetahuan manusia dalam bentuk sekumpulan pernyataan yang berbentuk “Jika pernyataan n maka akibat m ” sehingga dinamakan *If-Then rules*. Dalam makalah ini, sistem inferensi fuzzy yang diadopsi berupa tipe Takagi-Sugeno-Kang (TSK). Dalam tipe tersebut, bentuk “pernyataan n ” adalah kombinasi fuzzy dari variabel inputnya sedangkan “akibat m ” fungsi linier atau konstan. Bentuk himpunan fuzzy untuk bagian output biasanya berupa *fuzzy singleton*. Beberapa peneliti menggunakan metode Fuzzy TSK dalam perancangan pengendali *mobile robot*. Abouheaf & Gueaieb (2017) menggunakan metode TSK untuk merancang *mobile robot* yang dapat menghindari tubrukan dengan yang lain (Abouheaf and Gueaieb, 2017). Juang dkk. (2011) menerapkan metode fuzzy TSK dalam merancang navigasi *mobile robot* di suatu lingkungan yang tidak diketahui sebelumnya oleh *mobile robot* (Juang and Chang, 2011). Perancangan pengendali

berbasis fuzzy TSK juga dilakukan oleh Kermiche dkk. (2006) dalam mensimulasikan sistem navigasi *mobile robot* dalam penghindaran rintangan (Kermiche *et al.*, 2006).

METODE

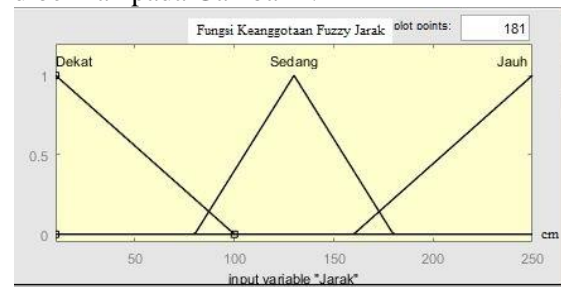
Diagram blok sistem yang dirancang diberikan dalam Gambar 1. *Setpoint* berupa jarak minimal antara robot dengan penghalang agar robot dapat menghindari halangan ini atau tidak menabraknya terutama saat berada di tikungan. *Setpoint* ditetapkan jarak 10 cm antara robot dan penghalang. Nilai jarak setiap saat diperoleh dari sensor HC-SR04 yang dipasang pada robot dengan topologi tertentu. Sensor HC-SR04 adalah sensor ultrasonik yang prinsip kerjanya menyalurkan gelombang bunyi kemudian menangkap pantulan dari penghalang yang ada di depan atau samping robot. Data jarak antara robot dan penghalang diperoleh dengan mengalikan laju rambat gelombang bunyi dengan waktu rata-rata penjalaran gelombang sampai ditangkap oleh bagian penerima sensor tersebut. Pergerakan robot menggunakan motor DC berjenis *brushed* DC motor dengan menggunakan rangkaian *driver* motor L298N. Robot berjalan dengan menggunakan prinsip *differential drive* yang artinya masing-masing roda bergerak independen. Pengendali robot menggunakan mikrokontroler Arduino Mega25 yang diisi algoritma teknik kendali berbasis logika fuzzy dengan sistem inferensi TSK.



Gambar 1. Diagram blok *mobile robot*

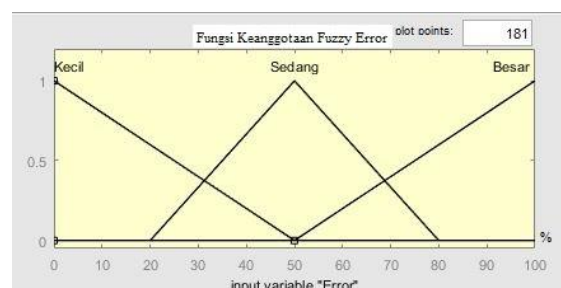
Sistem fuzzy TSK yang direalisasikan dalam *mobile robot* ini terdiri dari dua input dan satu output. Variabel input yang digunakan yaitu jarak dan selisih jarak (*error*). Input jarak adalah data pembacaan sensor ultrasonik HC-SR04 sedangkan *error* adalah nilai selisih

antara data yang ditangkap oleh sensor dengan nilai referensi. Sementara itu, output sistem fuzzy berupa laju pergerakan robot yang dihasilkan dengan mengatur pengiriman sinyal dari mikrokontroler ke rangkaian driver motor DC. Variabel input jarak dibagi dalam tiga himpunan fuzzy, yaitu dekat, sedang, jauh. Himpunan fuzzy "dekat" memiliki domain [10 100] dimana derajat keanggotaan tertinggi terletak pada jarak 10 cm. Himpunan fuzzy "sedang" memiliki domain [80 180] dimana derajat keanggotaan tertinggi terletak pada nilai 130 cm. Sementara itu, himpunan fuzzy "jauh" memiliki domain [160 250] dimana derajat keanggotaan tertinggi terletak pada nilai 250 cm. Bentuk fungsi keanggotaan himpunan fuzzy untuk input jarak berbentuk segitiga dan diberikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Fungsi keanggotaan himpunan fuzzy untuk input jarak

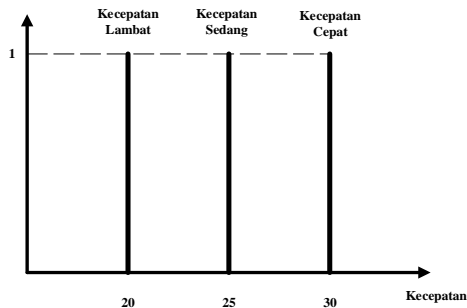
Variabel input kedua berupa selisih (*error*) antara data yang ditangkap oleh sensor dengan referensi. Nilai selisih disajikan dalam bentuk persentase 0% sampai 100%. Fungsi keanggotaan untuk input selisih dibagi menjadi tiga, yaitu kecil, sedang, besar seperti diberikan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Fungsi keanggotaan himpunan fuzzy untuk input selisih (*error*)

Sementara itu, variabel output sistem fuzzy TSK yang digunakan dalam prototipe *mobile robot* ini berupa nilai respon kecepatan motor DC (kecepatan robot). Himpunan fuzzy untuk variabel output ini dibagi menjadi tiga, yaitu lambat, sedang, dan cepat. Sesuai dengan

konsep sistem fuzzy TSK, bagian output dari sistem fuzzy-nya berbentuk himpunan fuzzy *singleton*. Bentuk fungsi keanggotaan untuk output kecepatan dibuat mengacu pada spesifikasi robot yang memiliki kecepatan minimal 20 cm/detik dan kecepatan maksimal 30 cm/detik. Bentuk fungsi keanggotaannya diberikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Fungsi keanggotaan himpunan fuzzy untuk output kecepatan

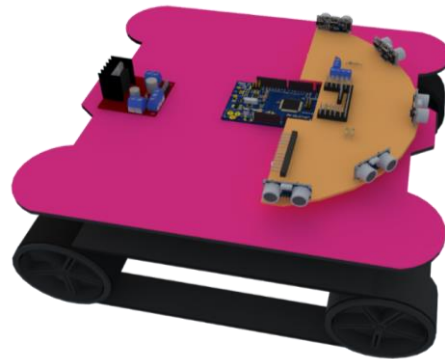
Setelah proses fuzzifikasi selesai kemudian dilanjutkan dengan tahapan berikutnya yaitu proses inferensi yang didalamnya membangun basis aturan dalam bentuk serangkaian ungkapan "Jika-Maka". Basis aturan yang digunakan dalam sistem inferensi ini disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Basis aturan sistem fuzzy

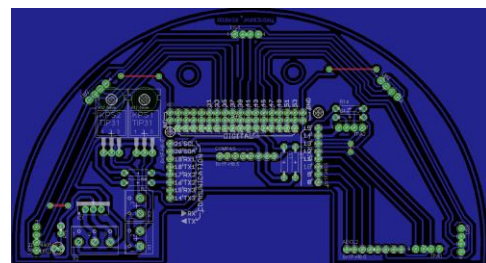
	jarak	dekat	sedang	jauh
error				
kecil		lambat	sedang	cepat
sedang		sedang	sedang	cepat
besar		lambat	sedang	cepat

Bentuk *mobile robot* yang digunakan dalam penelitian ini diberikan dalam Gambar 5. Sasis robot bagian atas terbuat dari bahan *acrylic* untuk meletakkan komponen pendukung robot seperti *driver* motor, mikrokontroler, baterai, dan sensor. Bahan *acrylic* digunakan agar *mobile robot* ringan tetapi cukup kuat menopang beban di atasnya. Pengendali berbasis logika fuzzy TSK diimplementasikan dalam mikrokontroler Arduino mega2560 yang berfungsi sebagai otak robot yang menyimpan program untuk mengendalikan kecepatan robot. Lima buah sensor ultrasonik sebagai detektor jarak disusun dengan bentuk seperti diberikan pada Gambar 5. Topologi sensor yang digunakan dirancang untuk memberikan kemudahan

kepada robot dalam menentukan ke arah mana gerak yang harus di tempuh ketika terdapat halangan. Sensor ultrasonik yang disusun dalam desain robot berjumlah lima buah sensor yang dibentuk setengah lingkaran dengan layout seperti diberikan pada Gambar 6. Sensor kanan bertugas untuk mendeteksi benda yang berada di kanan robot. Sensor depan berfungsi mendeteksi benda yang berada di depan robot, sedangkan sensor kiri berperan dalam mendeteksi benda yang berada di kiri robot. LCD digunakan sebagai penampil data memberikan kemudahan pada saat kalibrasi sensor, LCD juga berguna pada saat melihat respon jarak robot terhadap *setpoint* yang ditetapkan. Dimensi robot sebesar 24 x 24 x 12 cm. Driver motor L298N bertugas sebagai lalu lintas data antara mikrokontroler dengan motor. Motor yang berjumlah dua buah disambungkan ke port yang ada pada driver motor L298N.

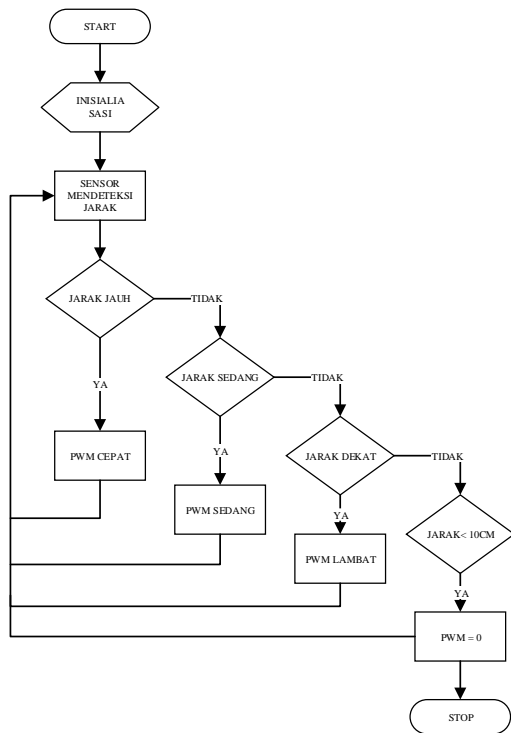


Gambar 5. Bentuk rancangan *mobile robot*



Gambar 6. Layout Sensor HC-SR04

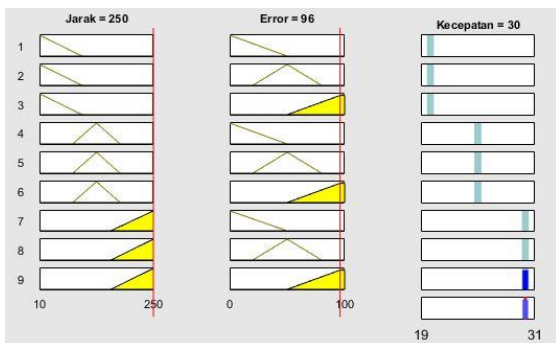
Secara umum, proses pengendalian gerak robot diberikan dalam bentuk diagram alir seperti diperlihatkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Diagram alir proses pengaturan kecepatan gerak robot

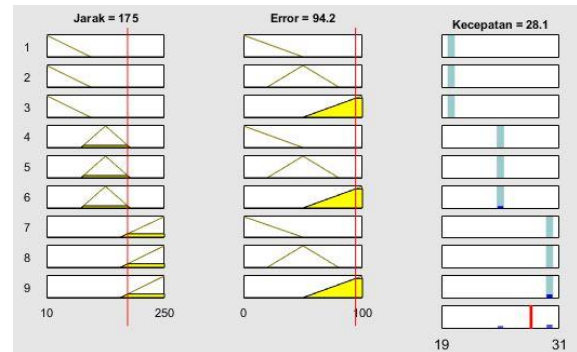
HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi proses inferensi fuzzy dilakukan dengan menggunakan *fuzzy logic toolbox* di lingkungan Matlab yang menggambarkan pola pergerakan robot saat robot mulai bergerak di posisi sejauh 250 cm dari penghalang sampai mendekati penghalang pada jarak 45 cm. Hasil simulasi diambil pada lima posisi robot yaitu pada jarak 250 cm, 175 cm, 130 cm, 90 cm dan 45 cm. Hasil simulasi untuk jarak 250 cm dan nilai *error* 96 % diberikan pada Gambar 8. Dari hasil simulasi tampak bahwa laju gerak robot sebesar 30 cm/detik.



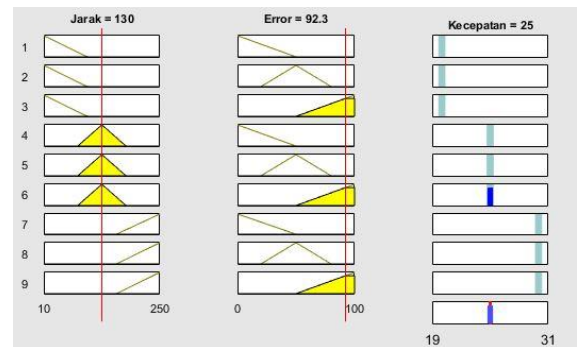
Gambar 8. Hasil simulasi nilai laju gerak robot pada jarak 250 cm dan *error* 96 %

Selanjutnya, simulasi dilakukan jika robot bergerak maju sehingga jaraknya sekarang sejauh 175 cm dari penghalang atau bergerak 75 cm dari posisi awal. Hasil simulasi kecepatan gerak robot pada jarak 175 cm dan nilai *error* 94,2 % diberikan pada Gambar 9. Dari hasil simulasi, laju gerak robot berkurang menjadi 28,1 cm/detik.

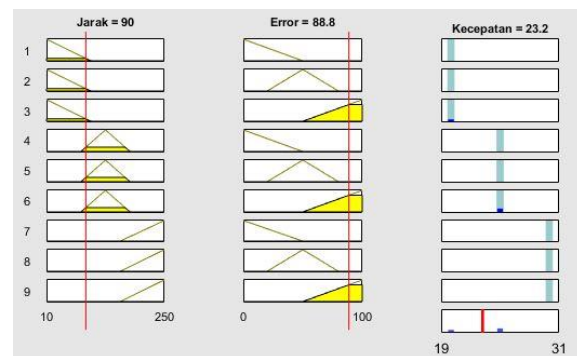


Gambar 9. Hasil simulasi nilai laju gerak robot pada jarak 175 cm dan *error* 94,2 %.

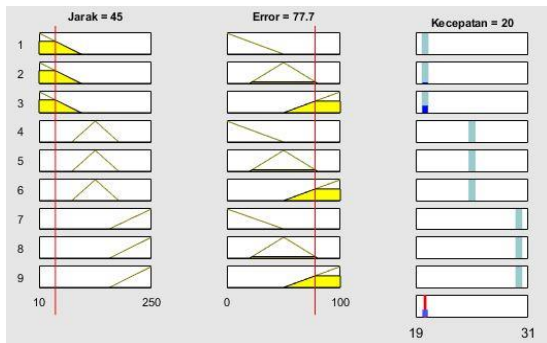
Simulasi untuk tiga posisi lainnya diperlihatkan pada Gambar 10-12.



Gambar 10. Hasil simulasi nilai laju gerak robot pada jarak 130 cm dan *error* 92,3 %.



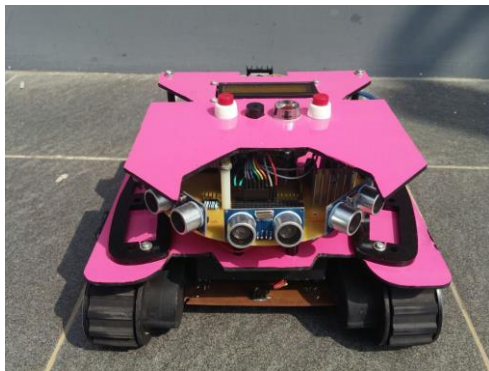
Gambar 11. Hasil simulasi nilai laju gerak robot pada jarak 90 cm dan *error* 88,8 %.



Gambar 12. Hasil simulasi nilai laju gerak robot pada jarak 45 cm dan error 77,7 %.

Hasil simulasi memperlihatkan bahwa semakin dekat ke penghalang laju gerak robot semakin melambat.

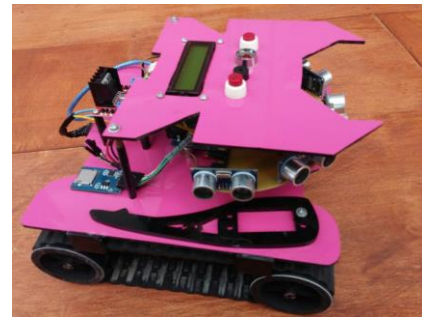
Realisasi *mobile robot* yang dibuat dalam penelitian ini diperlihatkan pada Gambar 13-15.



Gambar 13. Tampak depan robot



Gambar 14. Tampak samping kanan robot

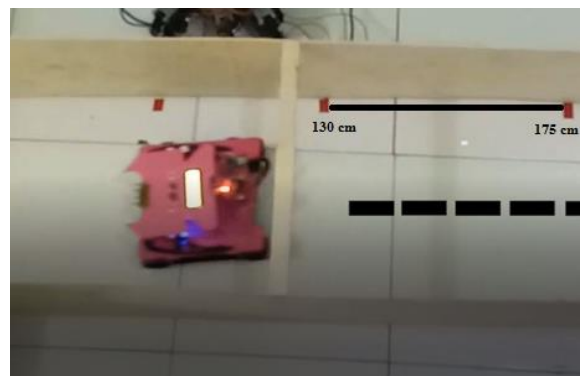


Gambar 15. Tampak samping kiri robot

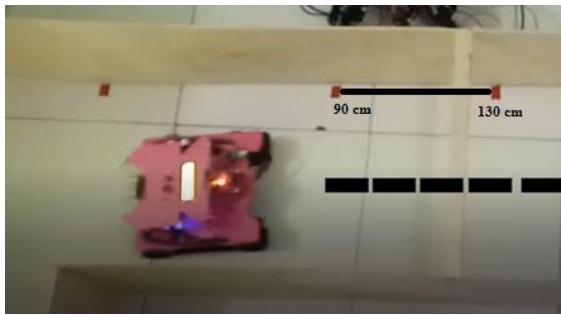
Dengan membuat kode program yang sesuai dengan sistem inferensi fuzzy TSK dan diinstalasi ke dalam mikrokontroler Arduino mega 256 yang digunakan sebagai pengendali gerak *mobile robot*, pengujian dilakukan untuk melihat perubahan laju gerak robot sesuai hasil simulasi dengan *fuzzy logic toolbox*. Snapshot pengujiannya diberikan pada Gambar 16-20. Dalam *snapshot* tersebut, setiap perpindahan atau pergerakan robot tersebut ditandai dengan garis hitam dimana apabila jarak antara garis hitam semakin rapat artinya kecepatan robot tersebut semakin melambat.



Gambar 16. Pergerakan robot dari posisi 250 cm sampai 175 cm



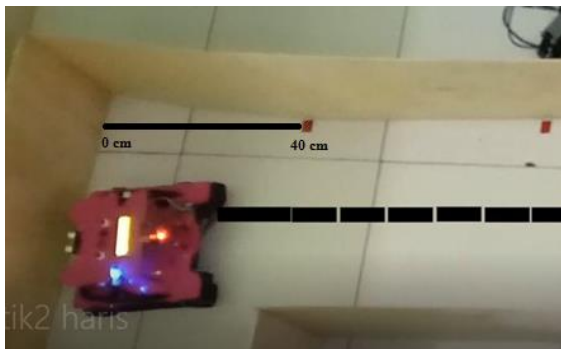
Gambar 17. Pergerakan robot dari posisi 175 cm sampai 130 cm



Gambar 18. Pergerakan robot dari posisi 130 cm sampai 90 cm

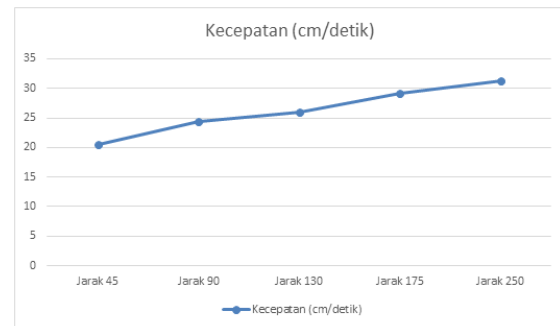


Gambar 19. Pergerakan robot dari posisi 90 cm sampai 40 cm



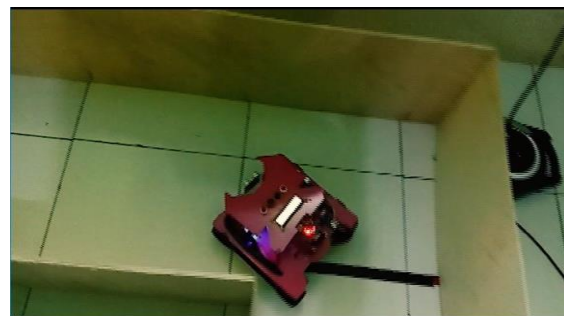
Gambar 20. Pergerakan robot dari posisi 40 cm mendekati penghalang

Grafik perubahan laju gerak robot diberikan pada Gambar 21. Dari grafik tersebut tampak bahwa laju gerak robot bervariasi sesuai dengan jarak robot terhadap penghalang. Ketika jarak robot dengan penghalang jauh maka laju gerak robot relatif besar. Besar laju gerak ini menurun seiring dengan pergerakan robot mendekati penghalang. Dengan demikian, sistem inferensi fuzzy TSK yang diterapkan dalam desain pengendalian gerak robot ini efektif dalam mengatur pergerakan robot sesuai dengan jarak antara robot dengan penghalang.

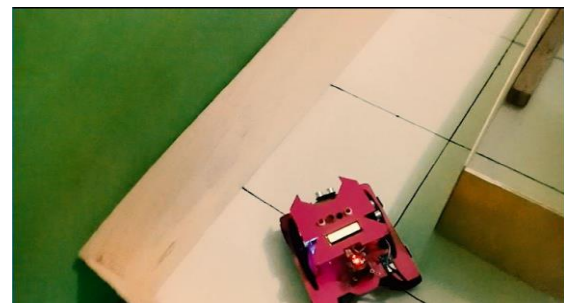


Gambar 21. Grafik perubahan laju gerak robot

Snapshot lainnya diberikan pada Gambar 22-23 untuk memperlihatkan kemampuan robot mengenali halangan dan bergerak manuver saat tiba di tikungan.



Gambar 22. Pengujian belok kiri



Gambar 23. Pengujian belok kanan

SIMPULAN DAN SARAN

Desain pengendali berbasis logika fuzzy tipe Takagi-Sugeno-Kang untuk mengatur laju gerak *mobile robot* telah diuraikan. Hasil eksperimen menunjukkan robot dapat bergerak maju, berbelok kiri kanan, dan menghindari rintangan serta mampu menyesuaikan kecepatan geraknya sesuai dengan jarak antara robot dan penghalang. Dari hasil pengujian, robot mampu mengubah laju gerak dari 31,25 cm/detik menjadi 20,45 cm/detik saat bergerak dari posisi 250 cm sampai 45 cm dari

halangan. Dengan demikian, pengendali yang dirancang efektif dalam mengatur pergerakan robot sesuai dengan tujuan pengendaliannya.

Meskipun hasil yang diperoleh telah memperlihatkan pengendalian yang efektif, namun ada beberapa hal yang harus diperbaiki dalam rangka meningkatkan performansi sistemnya. Akurasi nilai variabel input ditentukan oleh akurasi sensor jarak yang digunakan sehingga kualitas sensor menentukan performansi pengendalian secara keseluruhan. Selain itu, adanya nilai ketidakpastian baik terstruktur maupun tidak terstruktur dalam setiap parameter sistem dan lingkungan dimana robot berada memungkinkan penerapan metode kendali kokoh yang juga menggabungkan teknik kendali fuzzy dan metode kendali cerdas lainnya seperti jaringan syaraf tiruan seperti yang dilaporkan dalam (Zhu *et al.*, 2018).

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Jenderal Achmad Yani yang telah membantu sebagian dana penelitian ini dalam skema Penelitian Kompetitif Tahun Anggaran 2018.

DAFTAR PUSTAKA

Abouheaf, M. and Gueaieb, W. (2017) ‘Flocking motion control for a system of nonholonomic vehicles’, in *IEEE 5th International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors, IRIS 2017*, pp. 32–37. doi: 10.1109/IRIS.2017.8250094.

Boby, M. V., Yakushev, A. S. and Milostnaya, N. A. (2016) ‘Fuzzy algorithm of a mobile robot’s motion’, in *2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7910971.

Faisal, M. *et al.* (2018) ‘Human Expertise in

Mobile Robot Navigation’, *IEEE Access*, 6, pp. 1694–1705. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2780082.

Juang, C. F. and Chang, Y. C. (2011) ‘Evolutionary-group-based particle-swarm-optimized fuzzy controller with application to mobile-robot navigation in unknown environments’, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 19(2), pp. 379–392. doi: 10.1109/TFUZZ.2011.2104364.

Kermiche, S. *et al.* (2006) ‘Takagi-Sugeno Based Controller for Mobile Robot Navigation’, *Journal of Applied Sciences*, 6(8), pp. 1838–1844.

Najmurokhman, A., Wibowo, B. H. S. R. and Rafanca, N. A. (2017) ‘Desain dan Implementasi Robot Heksapoda dengan Misi Pemadaman Api’, *Jurnal Masyarakat Informatika (Jumanji)*, 01(01), pp. 1–9.

Peng, S. and Shi, W. (2018) ‘Adaptive Fuzzy Output Feedback Control of a Nonholonomic Wheeled Mobile Robot’, *IEEE Access*. IEEE, 6, pp. 43414–43424. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2862163.

Wardoyo, A. S. *et al.* (2015) ‘An investigation on the application of fuzzy and PID algorithm in the two wheeled robot with self balancing system using microcontroller’, in *International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*, pp. 64–68. doi: 10.1109/ICCAR.2015.7166003.

Zhu, Q. *et al.* (2018) ‘Robust Optimal Navigation Using Nonlinear Model Predictive Control Method Combined with Recurrent Fuzzy Neural Network’, *Mathematical Problem in Engineering*, pp. 1–19.