

Analisis Akurasi dan Presisi Sensor Ultrasonik Estimasi Level Tong Sampah Pintar Berbasis Arduino

Violla Gunova

Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung

Article History

Received : 15 December 2025

Revised : 20 December 2025

Accepted : 30 January 2026

Published : 04 March 2026

Corresponding author*:

violla.gunova@polban.ac.id

Cite This Article: Gunova, V. (2026). Analisis Akurasi dan Presisi Sensor Ultrasonik Estimasi Level Tong Sampah Pintar Berbasis Arduino. Jurnal Teknik Dan Science, 5(1), 91–97.

DOI:

<https://doi.org/10.56127/jts.v5i1.2634>

Abstract: This study analyzes the accuracy and precision of ultrasonic sensors for estimating waste levels in two sizes of Arduino-based smart trash cans in a community service program at a private high school in Jambi City. Two cardboard trash can prototypes were used as learning media, namely a small trash can measuring 10 cm × 10 cm × 20 cm and a large trash can measuring 30 cm × 30 cm × 50 cm. The testing was conducted by measuring the distance between the sensor and the surface of the waste/object at several predetermined reference distances using a ruler. For each distance condition, 10 readings were taken at 2-second intervals. The evaluation parameters included the mean, standard deviation (SD), bias, MAE, and RMSE. The results show that the average readings on both prototypes were close to the reference distance with a small bias. The variation in readings tended to increase at close distances, with the highest SD at a distance of 5 cm for both bins. When the bins were empty (20 cm for the small bin and 50 cm for the large bin), the measurements tended to be more accurate and precise than when the bins were full. In aggregate, the MAE and RMSE of the large bin (≈ 0.166 cm and ≈ 0.235 cm) were smaller than those of the small bin (≈ 0.225 cm and ≈ 0.335 cm). These findings confirm that ultrasonic sensors are suitable for monitoring waste levels, with the recommendation to avoid readings at very close distances and to apply data processing to improve the stability of level estimates.

Keywords: ultrasonic sensor, Arduino, waste level estimation, precision, smart trash

PENDAHULUAN

Pengelolaan sampah di lingkungan sekolah membutuhkan sistem yang mampu memantau kondisi tempat sampah secara sederhana dan andal. Pemantauan level/kepenuhan tempat sampah dapat membantu penjadwalan pembuangan, mencegah penumpukan, serta meningkatkan kebersihan lingkungan. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk pemantauan level adalah pengukuran jarak permukaan sampah terhadap sensor yang dipasang di bagian atas wadah. Sensor ultrasonik dipilih karena prinsip kerja berbasis time-of-flight yang relatif mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler, biaya implementasi rendah, serta mampu mengukur jarak tanpa kontak langsung dengan objek [1], [2], [3]

Meskipun implementasinya sederhana, performa sensor ultrasonik pada aplikasi nyata dipengaruhi oleh berbagai faktor. Secara teoritis, jarak dihitung dari waktu tempuh gelombang ultrasonik yang dipantulkan kembali oleh objek [1], [3]. Ketidakpastian muncul ketika kecepatan rambat bunyi di udara berubah akibat kondisi lingkungan (misalnya temperatur), sehingga menghasilkan pergeseran nilai jarak terukur [3], [4]. Selain faktor lingkungan, geometri wadah juga berperan penting. Pada wadah berukuran kecil, dinding lebih dekat terhadap sensor dan permukaan sampah sehingga pantulan multipath dari sisi

wadah berpotensi masuk ke penerima [5]. Kondisi ini dapat memunculkan variasi pembacaan (noise) dan outlier, terutama pada jarak dekat. Sebaliknya, pada wadah berukuran besar, lintasan pantulan cenderung lebih dominan berasal dari permukaan sampah, namun variasi permukaan sampah, kemiringan objek, serta pemasangan sensor tetap dapat menimbulkan fluktuasi pembacaan.

Pada banyak proyek smart bin, fokus evaluasi sering berhenti pada keberhasilan sistem bekerja (misalnya tutup otomatis terbuka ketika ada objek) tanpa mengukur karakteristik metrologi sensor secara kuantitatif. Padahal, untuk fungsi utama pemantauan level sampah, kestabilan dan konsistensi pembacaan lebih penting dibanding sekadar demonstrasi aktuasi. Oleh karena itu diperlukan pengujian yang menilai akurasi (kedekatan terhadap jarak referensi) dan presisi (konsistensi pembacaan pada kondisi yang sama) untuk memastikan hasil estimasi level dapat dipercaya.

Penelitian ini merupakan bagian dari luaran teknis program pengabdian kepada masyarakat (PkM) berupa pembelajaran mikrokontroler berbasis Arduino di salah satu SMA swasta di Kota Jambi. Prototipe tong sampah pintar dibuat menggunakan bahan kardus agar mudah diproduksi sebagai media pembelajaran, sekaligus memungkinkan pengujian perbedaan dimensi wadah. Dua prototipe digunakan, yaitu tong kecil berukuran 10 cm × 10 cm × 20 cm dan tong besar berukuran 30 cm × 30 cm × 50 cm. Pengukuran dilakukan pada beberapa kondisi jarak kedalaman sampah (jarak sensor ke permukaan sampah) dengan 10 kali pengulangan untuk setiap kondisi dan interval pengambilan data 2 detik, sehingga parameter rata-rata dan simpangan baku dapat dihitung sebagai indikator akurasi serta presisi.

Tujuan penelitian ini adalah (1) menganalisis akurasi pembacaan sensor ultrasonik terhadap jarak referensi pada masing-masing prototipe, (2) mengevaluasi presisi pembacaan melalui simpangan baku untuk setiap kondisi jarak, dan (3) membandingkan pengaruh dua ukuran wadah terhadap kestabilan pembacaan sensor sebagai dasar rekomendasi implementasi monitoring level sampah berbasis Arduino. Kontribusi utama penelitian ini adalah penyajian evaluasi kuantitatif berbasis pengukuran berulang pada dua dimensi tong yang berbeda dalam konteks penerapan nyata kegiatan PkM, sehingga hasilnya relevan untuk pengembangan perangkat pembelajaran sekaligus aplikasi smart bin sederhana.

TINJAUAN PUSTAKA

Sensor Ultrasonik untuk Pengukuran Jarak

Sensor ultrasonik mengukur jarak menggunakan prinsip time-of-flight (TOF), yaitu menghitung waktu tempuh gelombang ultrasonik dari pemancar menuju objek lalu dipantulkan kembali ke penerima. Jarak dihitung menggunakan persamaan:

$$d = \frac{v \cdot t}{2}$$

dengan :

d adalah jarak objek dari sensor (m atau cm), v adalah kecepatan bunyi di udara (m/s), dan t adalah waktu tempuh pulsa echo (s).

Prinsip TOF ini umum digunakan pada modul pengukur jarak ultrasonik low-cost dan mudah diintegrasikan pada sistem mikrokontroler [1], [2], [3].

Jarak Karakteristik Modul Ultrasonik HC-SR04

Pada implementasi prototipe tong sampah pintar, modul ultrasonik yang umum digunakan adalah HC-SR04. Modul ini bekerja pada frekuensi 40 kHz dan memiliki rentang ukur

tipikal sekitar 2–400 cm dengan akurasi yang sering dinyatakan sekitar orde milimeter pada kondisi ideal [2], [4]. Selain rentang ukur, karakter penting lainnya adalah sudut deteksi/beam angle. HC-SR04 sering disebut memiliki sudut deteksi sekitar 15° (sekitar ±15° terhadap sumbu sensor) [2], [4]. Sudut deteksi ini menyebabkan sensor “melihat” area berbentuk kerucut, sehingga objek selain target utama (misalnya dinding/tepi) dapat ikut berkontribusi pada echo yang diterima.

Sumber Error Pengukuran: Multipath, Pantulan Dinding, dan Near-Field

Dalam praktik, hasil pembacaan jarak ultrasonik tidak hanya dipengaruhi oleh target utama (permukaan sampah), tetapi juga oleh kondisi lingkungan dan geometri wadah:

Multipath reflection (pantulan ganda)

Pantulan dapat terjadi dari dinding/pojok, menghasilkan beberapa lintasan echo. Sistem penerima dapat menangkap echo yang bukan berasal dari lintasan langsung sensor–target, sehingga memunculkan pembacaan yang bias atau outlier. Fenomena multipath ini telah banyak dibahas dalam konteks sistem ranging ultrasonik, termasuk gangguan pantulan bidang dan sudut (corner) [5].

Pengaruh geometri wadah (kecil vs besar)

Pada wadah kecil, dinding lebih dekat terhadap “kerucut deteksi” sensor, sehingga peluang echo dari dinding ikut terbaca lebih tinggi [4], [5]. Pada wadah besar, dinding cenderung lebih jauh sehingga echo target utama lebih dominan—namun variasi bentuk permukaan sampah dan pemasangan sensor tetap bisa menimbulkan fluktuasi.

Near-field / blind-zone effect

Pada jarak sangat dekat, pembacaan ultrasonik bisa lebih tidak stabil karena adanya keterbatasan waktu pemulihan transduser dan proses deteksi echo (ring-down). Modul HC-SR04 sendiri menyatakan jarak minimum fungsional sekitar 2 cm, namun pada area dekat, sistem lebih sensitif terhadap gangguan dan variasi permukaan target [2], [6]

Jarak Akurasi dan Presisi serta Parameter Statistik

Evaluasi performa pengukuran umumnya dibedakan menjadi akurasi (kedekatan terhadap nilai benar/referensi) dan presisi (konsistensi hasil pada kondisi yang sama) [7]. Pada kondisi repeatability, faktor-faktor pengukuran dibuat konstan sehingga variasi hasil menggambarkan precision under repeatability conditions menurut standar ISO [8].

Pada penelitian ini, untuk setiap jarak referensi dilakukan pengukuran berulang $n = 10$ kali dengan interval 2 detik. Parameter yang digunakan:

1. Rata-rata (mean) sebagai indikator akurasi

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

2. Simpangan baku (standard deviation) sebagai indikator presisi

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

3. Bias (galat rata-rata terhadap referensi) Jika d_{ref} adalah jarak referensi:

$$\text{Bias} = \bar{x} - d_{ref}$$

4. MAE (Mean Absolute Error) sebagai indikator akurasi yang robust

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - d_{ref}|$$

5. RMSE (Root Mean Square Error) untuk menekankan error yang besar

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - d_{ref})^2}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian pada Tong Sampah Kecil

Pengujian pada tong kecil dengan dimensi panjang = 10 cm, lebar = 10 cm, dan tinggi = 20 cm dilakukan pada jarak antara sampah dengan sensor sepanjang: 5 cm, 10 cm, 15 cm, dan 20 cm dimana jarak antara sampah dengan sensor ultrasonik ini akan menjadi nilai referensi yang didapat dengan cara diukur menggunakan penggaris. Jarak 5 cm merupakan kondisi ting sampah pada saat penuh, sedangkan jarak 20 cm merupakan kondisi tong sampah dalam keadaan kosong. Setiap kondisi diukur 10 kali dengan interval 2 detik. Data pengujian dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Pengukuran pada Tong Sampah Kecil

Tong Kecil	Dimensi: 10x10x20												
Jarak Real	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Standar Deviasi	Rata-rata	Bias
5	4,3	5,2	5,6	4,7	3,9	5,6	5,0	5,1	4,8	4,9	0,53	4,91	-0,09
10	10,6	10,0	10,5	10,0	9,6	10,5	10,1	9,4	10,0	10,2	0,39	10,09	0,09
15	14,8	15,2	15,0	15,2	14,7	14,7	15,0	15,2	14,9	14,8	0,20	14,95	-0,05
20	20,1	20,0	20,0	19,9	20,2	20,0	20,0	19,9	20,0	20,0	0,09	20,01	0,01

Terlihat bahwa pembacaan rata-rata sensor pada tong kecil relatif mendekati jarak referensi dengan bias kecil ($|\text{bias}| \leq 0.09$ cm). Namun, presisi (ditunjukkan oleh SD) cenderung lebih besar pada jarak dekat (5–10 cm) dan menurun ketika jarak semakin besar. SD terbesar terjadi pada jarak 5 cm (0.53 cm), yang mengindikasikan adanya fluktuasi pembacaan lebih tinggi pada jarak dekat.

Hasil Pengujian pada Tong Sampah Besar

Pengujian pada tong besar dengan dimensi panjang = 30 cm, lebar = 30 cm, dan tinggi = 50 cm dilakukan pada jarak antara sampah dengan sensor sepanjang: 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm, dan 50 cm. Jarak 5 cm merupakan kondisi tong sampah pada saat penuh, sedangkan jarak 50 cm merupakan kondisi tong sampah dalam keadaan kosong. Setiap kondisi diukur 10 kali dengan interval 2 detik. Data pengujian dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Pengukuran pada Tong Sampah Besar

Tong Besar	Dimensi: 30x30x50												
Jarak Real	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Standar Deviasi	Rata-rata	Bias
5	5,0	5,2	4,8	4,1	5,2	5,4	4,7	5,0	5,0	4,9	0,36	4,93	-0,07
10	9,7	9,9	10,0	10,0	10,3	9,9	10,5	10,3	9,8	10,1	0,25	10,05	0,05
15	15,3	14,8	15,2	15,3	15,0	14,6	14,9	15,0	15,4	15,2	0,25	15,07	0,07
20	19,8	20,1	20,5	20,0	20,0	19,9	20,3	19,8	20,0	20,1	0,22	20,05	0,05
25	24,7	24,8	25,0	25,2	25,0	24,9	24,8	25,2	25,5	25,3	0,25	25,04	0,04
30	30,0	29,9	29,8	30,0	30,2	30,5	30,3	30,0	29,8	30,0	0,22	30,05	0,05
50	49,9	49,8	50,0	50,0	50,0	50,2	50,0	49,9	50,1	50,0	0,11	49,99	-0,01

Hasil menunjukkan rata-rata pembacaan sensor pada tong besar juga sangat dekat dengan jarak referensi ($|bias| \leq 0.07$ cm). Nilai SD berkisar 0.11–0.36 cm, dengan SD tertinggi pada jarak 5 cm (0.36 cm). Seperti pada tong kecil, variasi pembacaan cenderung lebih tinggi pada jarak dekat.

Perbandingan Akurasi dan Presisi Tong Kecil vs Tong Besar

Untuk membandingkan dua ukuran tong pada jarak yang sama, evaluasi dilakukan pada jarak referensi 5 cm, 10 cm, 15 cm, dan 20 cm (irisasi titik uji yang sama) dan pada kondisi tong sampah kosong (20 cm untuk tong kecil, 50 cm untuk tong besar). Berdasarkan data yang didapat pada tabel 1 dan 2, terlihat bahwa pada jarak 5-10 cm tong kecil menunjukkan SD lebih besar dibanding tong besar, yang berarti presisi tong kecil cenderung lebih rendah (lebih fluktuatif) pada jarak dekat. Hal ini konsisten dengan karakteristik sensor ultrasonik yang lebih sensitif terhadap efek near-field/ring-down dan potensi pantulan dinding pada ruang sempit.

Namun, pada jarak 15–20 cm, tong besar menunjukkan SD sedikit lebih besar dibanding tong kecil. Kondisi ini dapat terjadi karena perbedaan konfigurasi pantulan di dalam wadah besar yang dipengaruhi oleh pantulan pada bidang yang lebih luas serta variasi permukaan target yang tidak merata yang menyebabkan echo yang diterima bervariasi antar pengukuran. Hal ini juga didukung dengan pengukuran pada titik 20 cm dimana tong sampah kecil memiliki nilai yang lebih stabil daripada tong sampah yang besar dikarenakan pada kedalaman yang sama, tong sampah yang kecil dalam kondisi kosong, sedangkan tong sampah besar dalam kondisi yang ada isinya. Ketika kedua tong sampah dalam kondisi yang sama-sama kosong, nilai pengukuran relatif sama.

Untuk menilai akurasi keseluruhan, dihitung MAE dan RMSE terhadap jarak referensi. Hasil perhitungan agregat pada seluruh titik uji menunjukkan MAE tong kecil ≈ 0.225 cm dan RMSE ≈ 0.335 cm, sedangkan MAE tong besar ≈ 0.166 cm dan RMSE ≈ 0.235 cm. Secara keseluruhan, akurasi tong sampah besar sedikit lebih baik dibanding tong kecil (MAE dan RMSE lebih kecil). Namun dalam kondisi tertentu, tong sampah besar malah lebih jelek dibanding tong sampah kecil. Perbedaan ini menunjukkan bahwa dimensi

wadah dapat berpengaruh terhadap kestabilan dan akurasi pembacaan, meskipun keduanya tetap berada pada error yang kecil untuk rentang jarak pengujian.

Penyebab Terjadinya Variasi Pembacaan

Variasi pembacaan sensor ultrasonik pada kedua tong dapat dijelaskan melalui beberapa faktor:

Near-field dan keterbatasan jarak dekat

Pada jarak sangat dekat (misalnya 5 cm), efek near-field serta pemulihan transduser setelah pemancaran dapat meningkatkan fluktuasi pembacaan. Hal ini tercermin dari SD yang relatif lebih tinggi pada jarak 5 cm untuk kedua tong.

Pantulan dinding dan multipath

Karena sensor memiliki sudut pancaran tertentu, echo dapat berasal dari beberapa permukaan (permukaan sampah dan dinding tong). Pada tong kecil, jarak dinding yang lebih dekat dapat meningkatkan kemungkinan multipath sehingga fluktuasi lebih besar, terutama pada jarak dekat. Pada tong besar, meskipun dinding lebih jauh, variasi pantulan dari bidang yang lebih luas dan kondisi target tetap dapat menyebabkan SD meningkat pada kondisi tertentu.

Variasi permukaan target

Permukaan sampah/objek uji yang tidak rata dan tidak tegak lurus terhadap sensor dapat mengubah intensitas echo yang diterima dan memengaruhi stabilitas pembacaan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini mengevaluasi akurasi dan presisi sensor ultrasonik untuk estimasi level sampah pada dua ukuran prototipe tong sampah pintar berbahan kardus, yaitu tong kecil (10 cm × 10 cm × 20 cm) dan tong besar (30 cm × 30 cm × 50 cm), dalam konteks kegiatan PkM pembelajaran Arduino di salah satu SMA swasta di Kota Jambi. Pengukuran dilakukan pada beberapa jarak referensi dengan 10 kali pengulangan pada setiap kondisi dan interval 2 detik. Secara umum, hasil menunjukkan bahwa rata-rata pembacaan sensor pada kedua prototipe berada dekat dengan nilai referensi sehingga akurasi sistem tergolong baik untuk rentang pengujian yang dilakukan.

Ditinjau dari presisi pengukuran, variasi pembacaan (simpangan baku) cenderung lebih tinggi pada jarak dekat, terutama pada kondisi 5 cm, yang mengindikasikan bahwa pengukuran pada kondisi sangat dekat lebih sensitif terhadap gangguan pembacaan dan karakteristik sensor. Perbandingan pada jarak yang sama (5–20 cm) juga memperlihatkan bahwa dimensi wadah dapat memengaruhi kestabilan pembacaan; pada jarak dekat (5–10 cm) tong kecil cenderung lebih fluktuatif dibanding tong besar, sedangkan pada jarak menengah (15–20 cm) variasi dapat dipengaruhi oleh konfigurasi pantulan di dalam wadah serta kondisi permukaan target.

Selain itu, dari pengamatan hasil uji pada kondisi tong kosong, dapat disimpulkan bahwa pengukuran cenderung lebih akurat dan presisi ketika tidak ada isi di dalam tong. Hal ini terlihat pada kondisi tong kosong yang didefinisikan sebagai jarak 20 cm untuk tong kecil dan 50 cm untuk tong besar, di mana pembacaan jarak lebih mendekati nilai referensi dan memiliki variasi yang lebih kecil dibandingkan kondisi ketika ada “isi” (permukaan sampah/objek uji) pada jarak yang lebih dekat. Temuan ini memperkuat bahwa

keberadaan objek dengan permukaan yang tidak selalu rata serta potensi pantulan tambahan di dalam wadah dapat meningkatkan fluktuasi pembacaan.

Untuk pengembangan selanjutnya, sistem dapat ditingkatkan dengan menerapkan pemrosesan data seperti median filter atau moving average untuk menekan outlier dan meningkatkan kestabilan estimasi level, terutama pada jarak dekat. Pemetaan level juga dapat menggunakan batas jarak minimum stabil (misalnya ≥ 10 cm) agar pengukuran tidak berada pada kondisi yang cenderung menghasilkan variasi tinggi, disertai perbaikan mekanik pemasangan sensor agar tegak lurus terhadap target dan meminimalkan pantulan dinding/tepi wadah. Jika sistem digunakan pada lingkungan dengan temperatur yang berubah-ubah, kompensasi kecepatan bunyi berbasis sensor suhu dapat dipertimbangkan untuk mengurangi bias jarak. Validasi lanjutan dengan sampah nyata yang memiliki variasi material dan bentuk permukaan, serta pengembangan prototipe menggunakan material wadah yang lebih rigid dibanding kardus, diharapkan dapat meningkatkan robustnes sistem sebelum diimplementasikan pada penggunaan lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Texas Instruments Incorporated, "Ultrasonic Distance Measurement BoosterPack," 2015, Accessed: Feb. 27, 2026. [Online]. Available: www.ti.com.
- ElecFreaks, "Ultrasonic Ranging Module HC-SR04", Accessed: Feb. 27, 2026. [Online]. Available: www.Electfreaks.com
- Texas Instruments Incorporated, "Ultrasonic Sensing Basics," 2021, Accessed: Feb. 27, 2026. [Online]. Available: www.ti.com
- element14, "HC-SR04 Ultrasonic Sonar Distance Sensor." Accessed: Feb. 27, 2026. [Online]. Available: https://www.mouser.com/pdfDocs/Product-Overview-Adafruit-3942.pdf?srsltid=AfmBOopmx99p888vAJRWfEp_XpkdFujHzHyfyCJ3y6YHpIp1huARxtFB
- C.-H. Cheng *et al.*, "P2F-8 multipath interference between plane and corner reflection for ultrasonic ranging systems," in *2007 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*, IEEE, 2007, pp. 1633–1636.
- "Ultrasonic Inspection Formulas." Accessed: Feb. 27, 2026. [Online]. Available: <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Ultrasonics/ultrasonicFormula.xhtml>
- A. R. Priadi, R. A. Safitri, T. B. Pratama, and U. Latifa, "COMPARISON OF ACCURACY AND PRECISION OF DISTANCE READINGS ON HC-SR04, JSN-SR04T, AND A02YYUW ULTRASONIC SENSORS," *TESLA J. Tek. Elektro*, vol. 27, no. 1, pp. 19–29, 2025.
- "ISO 5725-1:2023(en), Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 1: General principles and definitions." Accessed: Feb. 27, 2026. [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:5725:-1:ed-2:v1:en>