

Design and development of an IoT-based smart waste bin with automatic incineration and remote monitoring

Fahri Syahnanda¹, Firahmi Rizky²

^{1,2}Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Indonesia

Email: fahrisyahnanda69@gmail.com; firahmi.rizky@gmail.com

ABSTRAK

Permasalahan pengelolaan sampah rumah tangga mendorong pengembangan teknologi yang mampu mendukung penanganan sampah secara lebih terintegrasi. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun prototipe tempat sampah pintar berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan mekanisme pembakaran otomatis dan monitoring jarak jauh. Sistem dikembangkan menggunakan *Prototype Model* dengan mengintegrasikan NodeMCU ESP8266, sensor ultrasonik HC-SR04 untuk mendeteksi tingkat keterisian, *limit switch* sebagai mekanisme *fail-safe*, serta motor servo dan *flame gun* untuk mekanisme pembakaran. Notifikasi status sistem dikirimkan kepada pengguna melalui Bot Telegram. Hasil pengujian menunjukkan bahwa prototipe mampu menjalankan fungsi deteksi keterisian, pembakaran otomatis berbasis *timer*, mekanisme *fail-safe*, dan pengiriman notifikasi sesuai skenario pengujian. Pada pengujian pembakaran menggunakan 500 gram campuran kertas dan karton, diperoleh massa sisa sebesar 22 gram atau reduksi massa sebesar 95,6%. Mekanisme pemicu api berhasil pada 10 dari 10 percobaan, sedangkan notifikasi Telegram diterima dengan waktu tunda sekitar 2–4 detik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa fungsi deteksi, pembakaran otomatis, keselamatan operasional, dan monitoring jarak jauh dapat diintegrasikan dalam satu prototipe berbasis IoT.

Kata Kunci: Internet of Things; pembakaran otomatis; pengelolaan sampah; sensor ultrasonik; tempat sampah pintar

ABSTRACT

Household waste management challenges encourage the development of technologies that support more integrated waste handling. This study aims to design and develop an Internet of Things (IoT)-based smart waste bin prototype with an automatic incineration mechanism and remote monitoring. The system was developed using the Prototype Model by integrating a NodeMCU ESP8266, an HC-SR04 ultrasonic sensor for waste-level detection, a limit switch as a fail-safe mechanism, and a servo motor and flame gun for automatic incineration. System status notifications were delivered to users through a Telegram Bot. The results showed that the prototype successfully performed waste-level detection, timer-based automatic incineration, fail-safe operation, and status notification according to the defined test scenarios. In the combustion test using 500 g of mixed paper and cardboard, 22 g of residual mass remained, corresponding to a mass reduction of 95.6%. The ignition mechanism succeeded in 10 out of 10 trials, while Telegram notifications were received with a delay of approximately 2–4 seconds. These results demonstrate that waste detection, automatic incineration, operational safety, and remote monitoring functions can be integrated into a single IoT-based prototype.

Keyword: Internet of Things; automatic incineration; waste management; ultrasonic sensor; smart waste bin

Corresponding Author:

Fahri Syahnanda,
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara,
Jl. Kapten Muchtar Basri No.3, Glugur Darat II, Kec. Medan Tim., Kota
Medan, Sumatera Utara 20238, Indonesia
Email: fahrisyahnanda69@gmail.com



1. PENDAHULUAN

Permasalahan pengelolaan sampah rumah tangga di Indonesia masih menjadi salah satu tantangan lingkungan yang membutuhkan penanganan secara berkelanjutan. Data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) tahun 2023 menunjukkan bahwa timbulan sampah nasional mencapai sekitar 35,9 juta ton per tahun, dengan rumah tangga menjadi salah satu sumber utama timbulan sampah. Kondisi tersebut memberikan tekanan terhadap sistem pengumpulan, pengangkutan, dan pemrosesan sampah, terutama ketika kapasitas Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) semakin terbatas. Permasalahan pengelolaan sampah juga berkaitan dengan dampak lingkungan dan kesehatan apabila sampah tidak ditangani dengan tepat (Badan Pusat Statistik, 2023; Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2023).

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) memberikan peluang untuk mendukung pengelolaan sampah melalui integrasi sensor, mikrokontroler, konektivitas internet, dan sistem pemantauan jarak jauh. IoT memungkinkan objek fisik dilengkapi kemampuan untuk mendeteksi kondisi lingkungan, memproses informasi, serta mengirimkan data melalui jaringan komunikasi (Kortuem et al., 2009). Dalam bidang pengelolaan sampah, berbagai penelitian telah memanfaatkan IoT untuk memantau tingkat keterisian tempat sampah dan mendukung proses pengelolaan sampah secara lebih terstruktur (Ali et al., 2020; Ahmed et al., 2023). Pengembangan tempat sampah pintar menggunakan sensor juga telah diterapkan untuk memberikan peringatan ketika tempat sampah mencapai kondisi tertentu (Kumar et al., 2016). Kajian sistematis oleh Sosunova dan Porras (2022) turut menunjukkan berkembangnya pemanfaatan IoT dalam sistem pengelolaan sampah pada lingkungan *smart city*.

Meskipun demikian, sebagian sistem tempat sampah pintar berbasis IoT lebih banyak berfokus pada fungsi pemantauan, pemberian informasi tingkat keterisian, dan dukungan terhadap proses pengumpulan sampah. Pendekatan tersebut belum secara langsung melakukan pengolahan terhadap sampah yang telah terkumpul pada perangkat. Konsep pengelolaan sampah berbasis IoT juga telah dikembangkan melalui berbagai arsitektur dan mekanisme otomatisasi (Bharadwaj et al., 2016). Kondisi ini membuka peluang pengembangan sistem yang tidak hanya melakukan pemantauan, tetapi juga mengintegrasikan mekanisme pengolahan sampah secara otomatis pada prototipe yang dikembangkan.

Salah satu metode pengolahan yang dapat mengurangi massa sampah adalah proses pembakaran. Namun, pembakaran sampah yang dilakukan tanpa pengendalian dapat menghasilkan emisi yang berpotensi memberikan dampak terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat (Rahmawati et al., 2024; Sidebang et al., 2025; Umah & Gusmira, 2024). Oleh karena itu, penerapan mekanisme pembakaran memerlukan pengendalian proses dan mekanisme keselamatan operasional. Pada sistem insinerasi yang lebih kompleks, proses pembakaran bahkan dikembangkan dengan berbagai pendekatan kontrol untuk menjaga kondisi operasi (Ding et al., 2023; Tang, Tian, & Wang, 2024; Tang, Wang, et al., 2024). Namun, penelitian ini tidak diarahkan pada optimasi proses pembakaran atau pengukuran emisi, melainkan pada pengembangan prototipe skala terbatas yang mengintegrasikan deteksi keterisian, pembakaran otomatis berbasis *timer*, mekanisme *fail-safe*, dan pemantauan melalui IoT.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini merancang prototipe tempat sampah pintar berbasis IoT yang mengintegrasikan sensor ultrasonik HC-SR04 untuk mendeteksi tingkat keterisian, NodeMCU ESP8266 sebagai unit pemrosesan, *limit switch* sebagai mekanisme keselamatan operasional, motor servo dan *flame gun* sebagai mekanisme pemicu pembakaran, serta Bot Telegram sebagai media notifikasi jarak jauh. Penelitian difokuskan pada sampah kering berupa kertas dan karton yang telah dipilah secara manual oleh pengguna. Batasan tersebut sesuai dengan rancangan penelitian yang tidak mencakup pemilahan otomatis maupun analisis emisi gas buang.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan prototipe tempat sampah berbasis IoT yang mampu mendeteksi kondisi keterisian, menjalankan proses pembakaran otomatis berdasarkan kondisi dan waktu yang telah ditentukan, mencegah aktivasi pembakaran ketika mekanisme keselamatan mendeteksi kondisi tidak sesuai, serta memberikan notifikasi status kepada pengguna melalui Telegram. Selain pengujian fungsi sistem, penelitian juga mengevaluasi kemampuan prototipe dalam mereduksi massa sampah kering serta menguji respons mekanisme *fail-safe*. Pengujian mencakup pengujian komponen, integrasi sistem, kualitas pembakaran, dan keselamatan operasional.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa sistem (*applied research*) dengan metode pengembangan *Prototype Model*. Metode ini digunakan untuk mendukung proses pengembangan prototipe melalui tahapan analisis kebutuhan, perancangan, implementasi, pengujian, serta evaluasi dan penyempurnaan sistem. Pendekatan prototipe memungkinkan rancangan perangkat keras dan perangkat lunak dievaluasi selama proses pengembangan sebelum diperoleh sistem yang sesuai dengan kebutuhan penelitian (Pressman, 2010). Tahapan penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut.

A. Analisis Kebutuhan

Tahap analisis kebutuhan dilakukan untuk mengidentifikasi kebutuhan perangkat keras dan perangkat lunak serta fungsi utama yang harus dimiliki sistem. Sistem dirancang untuk mampu mendeteksi kondisi keterisian tempat sampah, memeriksa kondisi keamanan sebelum proses pembakaran, menjalankan mekanisme pembakaran secara otomatis, dan mengirimkan informasi status sistem kepada pengguna melalui jaringan internet. Hasil analisis tersebut menjadi dasar dalam menentukan komponen dan arsitektur sistem yang dikembangkan.

B. Perancangan Sistem

Arsitektur sistem berpusat pada NodeMCU ESP8266 sebagai unit pemrosesan utama. Sensor ultrasonik HC-SR04 digunakan untuk mendeteksi tingkat keterisian sampah berdasarkan jarak objek terhadap sensor, sedangkan *limit switch* digunakan untuk mendeteksi kondisi keamanan sebelum mekanisme pembakaran diaktifkan. Sistem menggunakan motor servo untuk mengoperasikan mekanisme *flame gun*, sedangkan *buzzer* berfungsi sebagai indikator suara.

Seluruh komponen diintegrasikan pada prototipe dengan wadah berbahan besi galvanis berukuran 20 × 20 × 50 cm. Sistem memperoleh suplai daya dari *power supply* 5 V 10 A. Perancangan dilakukan dengan memperhatikan keterhubungan antara sensor, unit pemrosesan, aktuator, mekanisme pembakaran, dan sistem komunikasi sehingga setiap komponen dapat bekerja sebagai satu kesatuan.

C. Implementasi Sistem

Implementasi dilakukan dengan mengintegrasikan perangkat keras sesuai rancangan dan mengembangkan *firmware* menggunakan Arduino IDE. Program pada NodeMCU ESP8266 digunakan untuk membaca data sensor ultrasonik dan *limit switch*, mengendalikan motor servo dan *buzzer*, serta melakukan komunikasi melalui jaringan Wi-Fi.

Logika utama sistem menggunakan hasil pembacaan sensor ultrasonik dan *limit switch* sebagai kondisi sebelum siklus pembakaran dapat dijalankan. Berdasarkan rancangan pengujian, kondisi penuh ditetapkan ketika jarak sampah terhadap sensor ultrasonik berada di bawah 12 cm. Proses pembakaran hanya dapat dijalankan ketika *limit switch* juga menunjukkan kondisi aman. Setelah kedua kondisi terpenuhi, sistem menjalankan mekanisme pembakaran berbasis *timer* dan mengirimkan informasi status kepada pengguna melalui Bot Telegram.

D. Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi fungsi komponen dan integrasi sistem sesuai dengan rancangan. Pengujian dibagi menjadi empat bagian.

1. Pengujian fungsional komponen, dilakukan terhadap sensor ultrasonik HC-SR04, *limit switch*, motor servo, sistem pemicu api, *buzzer*, serta konektivitas Wi-Fi dan Telegram. Sensor ultrasonik diuji pada jarak 5 cm, 10 cm, dan 20 cm dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap pengukuran manual.
2. Pengujian integrasi sistem, dilakukan untuk memvalidasi keterhubungan antarbagian melalui skenario deteksi kondisi penuh, aktivasi siklus pembakaran otomatis, respons mekanisme *fail-safe*, dan pengiriman status sistem melalui Telegram. Kondisi penuh pada pengujian ditentukan berdasarkan jarak sampah terhadap sensor ultrasonik <12 cm dan kondisi keamanan ditentukan berdasarkan status *limit switch*.
3. Pengujian kualitas pembakaran, dilakukan menggunakan campuran kertas dan karton dengan massa awal 500 gram. Massa sisa setelah proses pembakaran ditimbang untuk menentukan persentase reduksi massa dengan persamaan:

$$\text{Reduksi Massa (\%)} = \frac{m_{\text{awal}} - m_{\text{akhir}}}{m_{\text{awal}}} \times 100\% \quad (1)$$

Pengujian ini juga mencatat durasi satu siklus operasi mulai dari aktivasi hingga penghentian otomatis.

4. Pengujian keamanan operasional, difokuskan pada mekanisme *fail-safe* menggunakan *limit switch* untuk memastikan mekanisme pembakaran tidak diaktifkan ketika kondisi keamanan tidak terpenuhi. Selain itu, kondisi fisik prototipe dan komponen elektronik diamati setelah tiga siklus pembakaran berturut-turut untuk mengidentifikasi adanya perubahan atau kerusakan fisik yang terlihat.

E. Evaluasi dan Penyempurnaan

Hasil pengujian digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian fungsi prototipe terhadap kebutuhan sistem yang telah ditentukan. Evaluasi difokuskan pada respons sensor, fungsi aktuator, integrasi proses pembakaran, mekanisme *fail-safe*, dan pengiriman notifikasi. Apabila ditemukan ketidaksesuaian fungsi selama pengembangan, dilakukan penyesuaian terhadap perangkat keras atau program sebelum prototipe digunakan pada tahap pengujian berikutnya. Tahapan evaluasi dan penyempurnaan ini merupakan bagian dari pendekatan *Prototype Model* yang digunakan dalam penelitian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Prototipe tempat sampah pintar berbasis *Internet of Things* (IoT) berhasil diimplementasikan dengan mengintegrasikan sensor ultrasonik HC-SR04, *limit switch*, NodeMCU ESP8266, motor servo, *flame gun*, *buzzer*, dan Bot Telegram. Integrasi perangkat keras dan perangkat lunak memungkinkan sistem melakukan deteksi tingkat keterisian, menjalankan mekanisme pembakaran berdasarkan kondisi yang telah ditentukan, menerapkan mekanisme *fail-safe*, serta memberikan informasi status kepada pengguna melalui Telegram.

A. Hasil Pengujian Fungsional dan Integrasi

Pengujian fungsional dilakukan untuk mengetahui kemampuan masing-masing komponen sebelum dievaluasi sebagai satu kesatuan sistem. Hasil pengujian sensor ultrasonik HC-SR04 pada jarak 5 cm, 10 cm, dan 20 cm menunjukkan rata-rata selisih pembacaan sekitar $\pm 0,5$ cm dibandingkan dengan pengukuran manual. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor dapat digunakan untuk mendeteksi perubahan tingkat keterisian pada prototipe.

Pengujian *limit switch* menunjukkan perubahan kondisi HIGH dan LOW sesuai dengan posisi mekanisme yang dideteksi, sedangkan motor servo dapat menjalankan mekanisme pemacu *flame gun* sesuai dengan perintah sistem. Pada pengujian mekanisme pemacu api, aktivasi berhasil dilakukan pada 10 dari 10 percobaan. Pengujian komunikasi juga menunjukkan bahwa NodeMCU ESP8266 dapat terhubung ke jaringan Wi-Fi dan mengirimkan notifikasi melalui Telegram dengan waktu tunda sekitar 2–4 detik.

Setelah pengujian masing-masing komponen, pengujian integrasi dilakukan untuk mengevaluasi alur kerja sistem secara keseluruhan. Sistem diuji pada kondisi penuh dengan ambang jarak kurang dari 12 cm, kondisi keamanan, proses pembakaran otomatis, dan pengiriman status melalui Telegram. Hasil pengujian menunjukkan bahwa fungsi-fungsi tersebut dapat bekerja sesuai skenario yang ditetapkan.

Tabel 1. Hasil Pengujian Integrasi Sistem

Skenario Pengujian	Input/Kondisi	Hasil yang Diharapkan	Hasil Pengujian
Deteksi penuh dan keamanan awal	Jarak sampah <12 cm dan <i>limit switch</i> pada posisi aman	Sistem mendeteksi kondisi penuh dan mengirim notifikasi “Siap Dibakar”	Sistem mendeteksi kondisi penuh dan notifikasi berhasil dikirim
Siklus pembakaran otomatis	Kondisi penuh dan kondisi keamanan terpenuhi	Servo mengaktifkan <i>flame gun</i> sesuai durasi <i>timer</i> , kemudian pembakaran dihentikan dan notifikasi akhir dikirim	Siklus pembakaran berjalan sesuai urutan yang dirancang
Respons keamanan (<i>fail-safe</i>)	Jarak sampah <12 cm, tetapi <i>limit switch</i> menunjukkan kondisi tidak aman	Sistem tidak mengaktifkan mekanisme pembakaran	Mekanisme pembakaran tidak diaktifkan
Monitoring melalui Telegram	Sistem menjalankan tahapan operasi	Informasi status sistem dikirim kepada pengguna	Notifikasi status berhasil diterima melalui Telegram

Empat skenario tersebut sesuai dengan rancangan pengujian integrasi pada penelitian, yaitu deteksi kondisi penuh dan keamanan awal, siklus pembakaran otomatis, respons *fail-safe*, serta pemantauan status melalui Telegram.

B. Hasil Pengujian Pembakaran dan Keamanan Operasional

Pengujian pembakaran dilakukan menggunakan 500 gram campuran kertas dan karton. Setelah proses pembakaran, massa material yang tersisa dalam bentuk abu adalah 22 gram. Berdasarkan data tersebut, persentase reduksi massa dihitung sebagai berikut:

$$\text{Reduksi Massa} = \frac{500-22}{500} \times 100\% = 95,6\% \quad (2)$$

Dengan demikian, pengujian menghasilkan reduksi massa sebesar 95,6%. Satu siklus operasi pembakaran tercatat berlangsung sekitar 5 menit 8 detik dari proses aktivasi hingga penghentian otomatis. Data tersebut menunjukkan bahwa mekanisme yang dikembangkan mampu mengurangi massa sampel kertas dan karton secara substansial pada kondisi pengujian yang dilakukan.



Gambar 1. Wujud Prototipe Tempat Sampah Pintar



Gambar 2. Proses Pembakaran Otomatis

Pengujian keamanan operasional dilakukan untuk mengevaluasi fungsi *limit switch* sebagai mekanisme *fail-safe*. Ketika kondisi tidak aman disimulasikan, sistem tidak menjalankan mekanisme pembakaran meskipun sensor ultrasonik mendeteksi kondisi penuh. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *limit switch* dapat berfungsi sebagai pengaman untuk mencegah aktivasi pembakaran ketika kondisi yang ditentukan belum terpenuhi.

Selain itu, inspeksi fisik dilakukan setelah tiga siklus pembakaran berturut-turut. Berdasarkan pengamatan yang dilakukan, tidak ditemukan deformasi wadah atau kerusakan yang terlihat pada komponen elektronik setelah rangkaian pengujian tersebut.

C. Pembahasan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa integrasi sensor ultrasonik, NodeMCU ESP8266, aktuator, mekanisme *fail-safe*, dan komunikasi melalui Telegram dapat membentuk sistem pengelolaan sampah berbasis IoT yang menjalankan fungsi deteksi, kontrol, dan monitoring dalam satu prototipe. Hasil ini sejalan dengan pemanfaatan IoT pada sistem pengelolaan sampah pintar yang menggunakan sensor dan konektivitas jaringan untuk mendukung pemantauan kondisi tempat sampah (Ali et al., 2020; Ahmed et al., 2023; Sosunova & Porras, 2022).

Berbeda dari sistem yang hanya berfokus pada monitoring tingkat keterisian dan pemberian notifikasi, prototipe yang dikembangkan dalam penelitian ini mengintegrasikan mekanisme pembakaran otomatis setelah kondisi keterisian dan keamanan terpenuhi. Pengujian terhadap campuran kertas dan karton menghasilkan reduksi massa sebesar 95,6%. Namun, nilai tersebut merupakan hasil dari satu kondisi pengujian dengan massa awal 500 gram, sehingga tidak dapat digeneralisasikan sebagai tingkat reduksi yang selalu dicapai untuk seluruh jenis dan jumlah sampah.

Mekanisme *fail-safe* menjadi bagian penting dalam sistem karena proses pembakaran hanya dapat diaktifkan ketika kondisi yang ditentukan terpenuhi. Pada pengujian, sistem menolak menjalankan mekanisme pembakaran ketika *limit switch* menunjukkan kondisi tidak aman. Meskipun demikian, hasil tersebut hanya menunjukkan kinerja mekanisme keselamatan operasional yang diuji dan tidak dapat diinterpretasikan sebagai bukti bahwa sistem telah memenuhi standar keselamatan pembakaran secara menyeluruh.

Pengembangan sistem ini menunjukkan bahwa integrasi IoT dengan mekanisme pembakaran otomatis dapat diterapkan pada prototipe tempat sampah pintar. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa fungsi deteksi keterisian, mekanisme pembakaran otomatis, *fail-safe*, dan monitoring melalui Telegram dapat bekerja secara terintegrasi sesuai dengan skenario pengujian. Pengujian pembakaran juga menghasilkan reduksi massa sebesar 95,6% pada sampel kertas dan karton yang digunakan. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu mengintegrasikan fungsi monitoring dan pengolahan sampah dalam satu prototipe berbasis IoT, sehingga berpotensi menjadi dasar bagi pengembangan sistem pengelolaan sampah kering yang lebih terintegrasi pada skala rumah tangga.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang, membangun, dan menguji prototipe tempat sampah pintar berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan mekanisme pembakaran otomatis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi tingkat keterisian sampah, menjalankan mekanisme pembakaran ketika kondisi yang ditentukan terpenuhi, menerapkan mekanisme keselamatan operasional (*fail-safe*) melalui *limit switch*, serta mengirimkan notifikasi status kepada pengguna melalui Telegram. Pada pengujian menggunakan 500 gram campuran kertas dan karton, massa sisa setelah pembakaran sebesar 22 gram, sehingga diperoleh reduksi massa sebesar 95,6%. Mekanisme pemacu api berhasil pada 10 dari 10 percobaan, sedangkan notifikasi Telegram diterima dengan waktu tunda sekitar 2–4 detik. Hasil tersebut menunjukkan bahwa fungsi deteksi, pembakaran otomatis, mekanisme *fail-safe*, dan monitoring jarak jauh dapat bekerja secara terintegrasi sesuai dengan skenario pengujian. Penelitian ini masih terbatas pada skala prototipe, jenis sampah yang diuji, dan belum mencakup analisis emisi gas buang. Oleh karena itu, pengembangan selanjutnya dapat diarahkan pada penambahan sensor suhu untuk meningkatkan pengendalian proses pembakaran, penerapan sistem filtrasi asap yang disertai pengujian emisi, pengujian terhadap variasi jenis dan massa sampah serta jumlah siklus yang lebih banyak, dan pengembangan aplikasi *mobile* untuk mendukung monitoring dan kontrol sistem secara lebih terintegrasi.

REFERENSI

- Ahmed, M. M., Hassanien, E., & Hassanien, A. E. (2023). IoT-based intelligent waste management system. *Neural Computing and Applications*, 35(32), 23551–23579. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08970-7>
- Ali, T., Irfan, M., Alwadie, A. S., & Glowacz, A. (2020). IoT-based smart waste bin monitoring and municipal solid waste management system for smart cities. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(12), 10185–10198. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04637-w>
- Badan Pusat Statistik. (2023). *Statistik lingkungan hidup Indonesia 2023*. BPS.
- Bharadwaj, A. S., Rego, R., & Chowdhury, A. (2016). IoT based solid waste management system: A conceptual approach with an architectural solution as a smart city application. In *2016 IEEE Annual India Conference (INDICON)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/INDICON.2016.7839147>
- Ding, H., Qiao, J., Huang, W., & Yu, T. (2023). Event-triggered online learning fuzzy-neural robust control for furnace temperature in municipal solid waste incineration process. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 21(2), 1201–1213. <https://doi.org/10.1109/TASE.2023.3294420>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2023). *Data timbulan sampah nasional tahun 2023*. KLHK RI.
- Kortuem, G., Kawsar, F., Sundramoorthy, V., & Fitton, D. (2009). Smart objects as building blocks for the Internet of Things. *IEEE Internet Computing*, 14(1), 44–51. <https://doi.org/10.1109/MIC.2009.143>
- Kumar, N. S., Vuayalakshmi, B., Prarthana, R. J., & Shankar, A. (2016). IoT based smart garbage alert system using Arduino UNO. In *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)* (pp. 1028–1034). IEEE. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2016.7848162>
- Pressman, R. S. (2010). *Software engineering: A practitioner's approach* (7th ed.). McGraw-Hill Education.
- Rahmawati, V., Hayat, A. L., & Salam, A. (2024). Analisis dampak pencemaran udara terhadap kesehatan masyarakat di perkotaan. *SEMAR: Jurnal Sosial dan Pengabdian Masyarakat*, 2(3), 17–24. <https://doi.org/10.59966/semar.v2i3.885>
- Sidebang, P., Arianty, R., & Nasrun, I. (2025). *Bahaya pembakaran sampah bagi kesehatan dan lingkungan*. CV Eureka Media Aksara.
- Sosunova, I., & Porras, J. (2022). IoT-enabled smart waste management systems for smart cities: A systematic review. *IEEE Access*, 10, 73326–73363. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3188308>
- Tang, J., Tian, H., & Wang, T. (2024). A review of model predictive control for the municipal solid waste incineration process. *Sustainability*, 16(17), Article 7650. <https://doi.org/10.3390/su16177650>
- Tang, J., Wang, T., Xia, H., & Cui, C. (2024). An overview of artificial intelligence application for optimal control of municipal solid waste incineration process. *Sustainability*, 16(5), Article 2042. <https://doi.org/10.3390/su16052042>
- Umah, R., & Gusmira, E. (2024). Dampak pencemaran udara terhadap kesehatan masyarakat di perkotaan. *Profit: Jurnal Manajemen, Bisnis dan Akuntansi*, 3(3), 103–112. <https://doi.org/10.58192/profit.v3i3.2246>