

Implementasi Sistem IoT untuk Pemantauan Kualitas Udara dan Deteksi Dini Kebakaran di Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST)

Muhammad Syirajuddin S^{*1}, Dianthy Marya², M. Nanak Zakaria³, Hudiono⁴,
Ahmad Wilda Y⁵, Rizky Ardiansyah⁶

^{1,2,3,4,5,6}Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang

e-mail: ^{1,*}syirajuddin@polinema.ac.id, ²dianthy@polinema.ac.id, ³nanak_zach@polinema.ac.id,

⁴hudiono@polinema.ac.id, ⁵ahmadwildan@polinema.ac.id, ⁶rizkyardiansyah@polinema.ac.id

Abstrak

Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) berperan penting dalam pengelolaan sampah perkotaan, namun aktivitasnya berpotensi menimbulkan risiko lingkungan dan keselamatan, terutama akibat emisi gas berbahaya seperti metana (CH_4), amonia (NH_3), hidrogen sulfida (H_2S), partikulat debu ($\text{PM}_{2.5}$), serta risiko kebakaran akibat akumulasi gas mudah terbakar. TPST Pandesari Sehati di Kabupaten Malang merupakan salah satu fasilitas yang belum memiliki sistem pemantauan kualitas udara dan deteksi dini kebakaran yang memadai. Untuk menjawab permasalahan tersebut, kegiatan pengabdian kepada masyarakat ini mengimplementasikan sistem berbasis Internet of Things (IoT) yang terdiri atas mikrokontroler ESP32, sensor MQ-4 (CH_4), MQ-135 (NH_3), MQ-136 (H_2S), GP2Y1010AU0F ($\text{PM}_{2.5}$), dan sensor nyala api inframerah. Data dari sensor dikirim secara real-time ke platform cloud Firebase dan ditampilkan melalui aplikasi Android yang dilengkapi notifikasi dini, indikator LED (hijau–kuning–merah), serta alarm buzzer saat kondisi berbahaya terdeteksi. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu memantau parameter lingkungan dengan akurasi tinggi (misalnya sensor $\text{PM}_{2.5}$ mencapai 97,73% akurasi) dan memberikan respons cepat terhadap potensi bahaya. Pelatihan operasional juga telah diberikan kepada pengelola TPST untuk memastikan keberlanjutan penggunaan sistem. Implementasi ini tidak hanya meningkatkan keselamatan kerja dan kesehatan lingkungan, tetapi juga menjadi langkah awal menuju konsep smart waste management di wilayah perkotaan.

Kata kunci— IoT, pemantauan kualitas udara, deteksi dini kebakaran, TPST, ESP32, sensor gas, smart waste management.

1. PENDAHULUAN

Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) memainkan peran sentral dalam sistem pengelolaan limbah perkotaan. Namun, aktivitas di TPST seringkali menghasilkan emisi gas berbahaya seperti metana (CH_4), amonia (NH_3), hidrogen sulfida (H_2S), serta partikulat halus ($\text{PM}_{2.5}$ dan PM_{10}), yang berpotensi mengancam kesehatan pekerja dan masyarakat sekitar [1]. Gas metana, yang dihasilkan melalui dekomposisi anaerobik sampah organik, tidak hanya berkontribusi terhadap pemanasan global tetapi juga bersifat mudah terbakar meningkatkan risiko kebakaran spontan jika terakumulasi dalam konsentrasi tinggi [2].

Kebakaran di TPST merupakan ancaman serius yang dapat merusak infrastruktur, melepaskan polutan toksik seperti dioksin dan furan ke atmosfer, serta menyebabkan gangguan kesehatan jangka panjang bagi populasi di sekitarnya [3]. Penelitian menunjukkan bahwa sekitar 60% insiden kebakaran di TPST disebabkan oleh akumulasi gas metana yang

tidak terdeteksi secara dini [4]. Selain itu, asap kebakaran sampah mengandung karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), dan senyawa organik volatil (VOC) yang dapat menyebar hingga radius beberapa kilometer [5].

Di Indonesia, regulasi seperti Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 12 Tahun 2020 mewajibkan setiap TPST memiliki sistem pemantauan kualitas udara dan pencegahan kebakaran [6]. Namun, studi evaluasi mengungkap bahwa kurang dari 30% TPST di Indonesia telah mengadopsi sistem pemantauan terintegrasi, dan hanya sekitar 20% yang dilengkapi deteksi dini kebakaran yang memadai [7]. Salah satu contohnya adalah TPST Pandesari Sehati di Kabupaten Malang, yang mengelola 15–20 ton sampah per hari namun belum memiliki infrastruktur pemantauan lingkungan yang memadai [8].

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) menawarkan solusi efektif untuk tantangan ini. Sistem berbasis sensor dan konektivitas nirkabel memungkinkan pemantauan *real-time* terhadap parameter lingkungan berisiko, serta pemberian

notifikasi dini saat ambang bahaya terlampaui [9]. Studi percontohan di Kota Malang membuktikan bahwa implementasi IoT dapat mengurangi waktu respons terhadap potensi kebakaran hingga 70% dan meningkatkan akurasi pemantauan polutan hingga 95% [10].

Pemanfaatan *Internet of Things* (IoT) juga telah berkembang dalam bidang pengelolaan sampah melalui konsep *smart waste management*. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa integrasi sensor, mikrokontroler, dan platform berbasis web maupun *cloud* mampu mendukung pemantauan kondisi tempat sampah secara *real-time*, mengoptimalkan proses pengumpulan sampah, serta meningkatkan efisiensi operasional pengelolaan limbah. Selain itu, sistem IoT memungkinkan pemantauan parameter lingkungan seperti volume sampah, suhu, dan keberadaan gas berbahaya sehingga dapat mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat dalam pengelolaan fasilitas pengolahan sampah [11], [12]. Namun demikian, sebagian besar implementasi tersebut masih berfokus pada pemantauan kapasitas tempat sampah atau proses pengangkutan sampah, sedangkan penerapan sistem IoT yang secara terintegrasi melakukan pemantauan kualitas udara sekaligus deteksi dini kebakaran pada lingkungan Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) masih relatif terbatas. Kondisi ini menunjukkan perlunya pengembangan sistem yang mampu memberikan peringatan dini terhadap potensi bahaya sekaligus mendukung keselamatan kerja dan keberlanjutan operasional TPST.

Mengingat pentingnya perlindungan lingkungan dan keselamatan kerja di lingkungan Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST), serta besarnya potensi pemanfaatan teknologi *Internet of Things* (IoT), kegiatan pengabdian ini difokuskan pada implementasi sistem IoT sebagai sarana pemantauan kondisi udara dan deteksi dini potensi kebakaran secara *real-time*. Sistem yang dikembangkan memanfaatkan berbagai sensor lingkungan untuk memantau parameter kualitas udara dan mendeteksi indikasi awal terjadinya kebakaran, kemudian mengirimkan informasi serta peringatan kepada pengelola sehingga tindakan mitigasi dapat dilakukan dengan lebih cepat. Sistem ini dirancang agar mudah dioperasikan oleh pengelola TPST, memiliki biaya implementasi dan pemeliharaan yang terjangkau, serta dapat diterapkan secara berkelanjutan sebagai solusi teknologi tepat guna untuk meningkatkan aspek keselamatan kerja dan pengelolaan lingkungan di TPST Pandesari Sehati.



Gambar 1. Kondisi dan Situasi di TPST Pandesari Sehati

2. METODE

2.1 Lokasi dan Subyek

Kegiatan pengabdian dilaksanakan di TPST Pandesari Sehati, Desa Pandesari, Kecamatan Pujon, Kabupaten Malang. TPST ini melayani lima kelurahan dengan populasi terlayani sekitar 50.000 jiwa dan mengelola rata-rata 15–20 ton sampah per hari, terdiri atas 60% sampah organik dan 40% anorganik [8]. Struktur pengelola mencakup 1 kepala unit, 3 supervisor, 15 pekerja pemilah, 5 pekerja pengomposan, 4 administrasi, dan 2 petugas keamanan. Sebelum implementasi, studi baseline menunjukkan ketiadaan sistem pemantauan kualitas udara maupun deteksi kebakaran [8].

2.2 Desain Sistem

Sistem dirancang berbasis arsitektur IoT dengan tiga komponen utama: (1) node sensor, (2) mikrokontroler, dan (3) platform *cloud* dan antarmuka pengguna.

1) Node Sensor:

- Sensor gas MQ-4 untuk deteksi CH₄ [13],
- MQ-135 untuk NH₃ [14],
- MQ-136 untuk H₂S [15],
- GP2Y1010AU0F untuk PM2.5 [16],
- Sensor nyala api inframerah (IR Flame) untuk deteksi langsung keberadaan api.

2) Mikrokontroler:

ESP32 dipilih karena memiliki modul Wi-Fi dan Bluetooth bawaan, konsumsi daya rendah, serta kompatibilitas luas dengan berbagai sensor [17]. Data dari sensor dibaca setiap 10 detik dan diproses secara lokal sebelum dikirim ke *cloud*.

3) Platform *Cloud* dan Antarmuka:

Data dikirim ke Firebase Realtime Database melalui protokol HTTP. Aplikasi Android khusus dikembangkan untuk menampilkan data *real-time*, riwayat historis, dan notifikasi push saat parameter melebihi ambang batas (AMAN: hijau, SIAGA: kuning, BERBAHAYA: merah). Sistem juga dilengkapi indikator LED dan buzzer sebagai peringatan lokal.

2.3 Tahapan Pelaksanaan

Pelaksanaan mengikuti pendekatan partisipatif dengan empat tahap utama:

1. Persiapan: Survei lapangan, identifikasi titik rawan, dan koordinasi dengan mitra serta pemerintah daerah.
2. Pengembangan dan Kalibrasi: Perakitan prototipe, kalibrasi sensor menggunakan alat pembanding standar (*Air Quality Detector*), dan uji fungsional di laboratorium.
3. Implementasi: Instalasi permanen di lokasi strategis di TPST (dekat area kompos dan tumpukan sampah), integrasi dengan jaringan internet, dan verifikasi konektivitas.
4. Pelatihan dan Evaluasi: Pelatihan teknis kepada pengelola TPST, diseminasi hasil, dan evaluasi dampak melalui kuesioner berbasis skala Likert.

Pendekatan ini mengintegrasikan prinsip IPTEKS Sosial Budaya (IPTEKS SB), memastikan teknologi tidak hanya berfungsi secara teknis tetapi juga sesuai dengan konteks sosial, budaya, dan lingkungan lokal [8].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

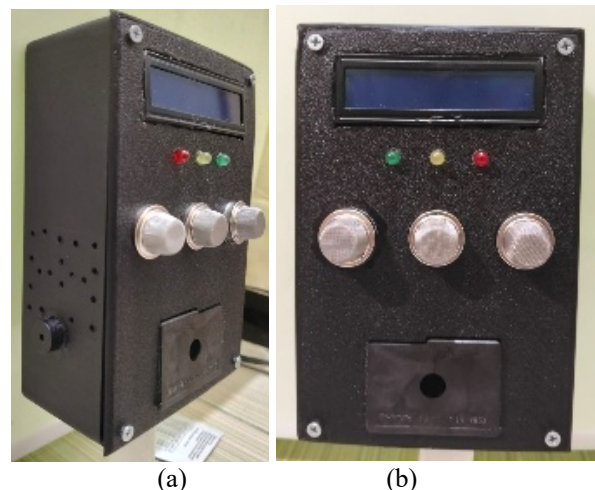
3.1. Realisasi Sistem Berbasis IoT

Sistem pemantauan kualitas udara dan deteksi dini kebakaran berhasil diimplementasikan di TPST Pandesari Sehati menggunakan arsitektur IoT berbasis mikrokontroler ESP32. Perangkat terintegrasi dengan lima sensor utama: MQ-4 (CH₄), MQ-135 (NH₃), MQ-136 (H₂S), GP2Y1010AU0F (PM2.5), dan sensor nyala api inframerah. Data dikirim secara *real-time* ke platform *cloud* Firebase dan ditampilkan melalui aplikasi Android khusus yang dikembangkan untuk memudahkan pemantauan jarak jauh.

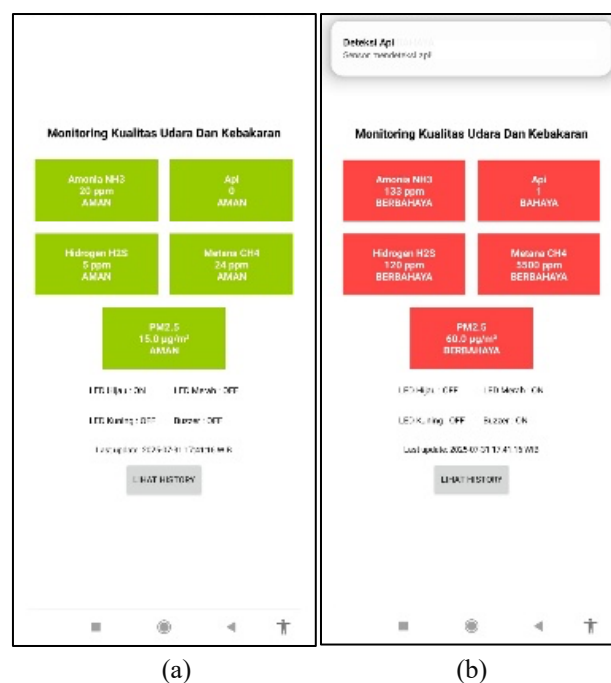
Fitur utama sistem mencakup:

- Indikator LED tiga warna (hijau–kuning–merah) untuk status lingkungan,
- Alarm buzzer lokal saat kondisi berbahaya terdeteksi,
- Notifikasi push pada aplikasi Android,
- Tampilan data *real-time* dan riwayat historis.

Desain ini selaras dengan prinsip *smart environmental monitoring* yang diusulkan oleh Razzaque et al. [9], di mana integrasi sensor, konektivitas nirkabel, dan antarmuka pengguna menjadi kunci dalam pengelolaan risiko lingkungan berbasis data.



Gambar 2. Tampilan Alat dari (a) Samping, (b) Depan



Gambar 3. Tampilan Aplikasi (a) Saat Kualitas Udara Aman, dan (b) Saat Kualitas Udara Bahaya

3.2. Akurasi dan Kinerja Sensor

Proses kalibrasi sensor dilakukan menggunakan *Air Quality Detector* sebagai alat pembanding (*reference instrument*) untuk mengevaluasi kinerja sistem IoT yang dikembangkan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor GP2Y1010AU0F untuk pengukuran konsentrasi PM2.5 memiliki tingkat akurasi sebesar 97,73% dengan error rata-rata 2,27% terhadap hasil pengukuran alat referensi. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sensor mampu memberikan hasil pengukuran yang sangat mendekati instrumen standar sehingga layak digunakan untuk pemantauan kualitas udara secara *real-time* di lingkungan TPST. Sementara itu, sensor gas MQ-4, MQ-135, dan MQ-136

memperlihatkan pola respons yang konsisten terhadap perubahan konsentrasi gas yang terukur oleh alat pembanding, dengan hubungan yang bersifat linier sesuai karakteristik sensitivitas yang dilaporkan pada datasheet masing-masing sensor [13]–[15]. Hasil ini mengindikasikan bahwa sistem mampu mendeteksi perubahan kadar metana (CH_4), amonia (NH_3), dan hidrogen sulfida (H_2S) secara andal sebagai indikator potensi pencemaran udara maupun risiko kebakaran di area TPST.

Dalam pengujian lapangan awal di TPST Annadhofa, sistem berhasil mendeteksi lonjakan konsentrasi $\text{PM}_{2.5}$ hingga $249 \mu\text{g}/\text{m}^3$, jauh melampaui ambang batas kualitas udara harian yang direkomendasikan WHO sebesar $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Kondisi tersebut dipicu oleh aktivitas kendaraan pengangkut sampah yang meningkatkan konsentrasi partikulat di sekitar lokasi. Hasil pengukuran sistem menunjukkan kesesuaian dengan nilai yang diperoleh menggunakan Air Quality Detector, sehingga perubahan status sistem dari AMAN menjadi SIAGA dan selanjutnya BERBAHAYA dapat dipicu secara tepat. Perubahan status tersebut secara otomatis diikuti dengan pengiriman notifikasi ke aplikasi serta aktivasi alarm lokal sebagai mekanisme peringatan dini. Temuan ini sejalan dengan penelitian Situmorang *et al.* [5], yang menyatakan bahwa aktivitas operasional TPST merupakan salah satu sumber utama peningkatan konsentrasi partikulat halus di lingkungan sekitar.

Tabel 1. Rekapitulasi Kuesioner Kepuasan Mitra

Pertanyaan	SS	S	TS	STS
Kegiatan PPM yang dilaksanakan memberikan solusi atas masalah yang dihadapi mitra	90%	10%	0%	0%
Anggota tim yang terlibat dalam kegiatan PPM aktif dalam memberikan bantuan	80%	20%	0%	0%
Frekuensi pendampingan yang dilakukan oleh tim PPM dirasakan sudah sesuai	100%	0%	0%	0%
Terjadi peningkatan kemandirian atau penambahan pengetahuan dan ketrampilan pada mitra	80%	20%	0%	0%

Pertanyaan	SS	S	TS	STS
Secara keseluruhan mitra merasakan kepuasan atas kegiatan PPM yang telah dilaksanakan	100%	0%	0%	0%
Rata-rata	90%	10%	0%	0%

Keterangan:

SS = sangat setuju

S = setuju

TS = tidak setuju

STS = sangat tidak setuju

3.3. Respons Sistem terhadap Potensi Bahaya

Sistem deteksi dini kebakaran berbasis sensor inframerah menunjukkan waktu respons <2 detik terhadap sumber api simulasi. Ketika nyala terdeteksi, LED berubah menjadi merah, buzzer aktif, dan notifikasi darurat dikirim ke pengelola melalui aplikasi. Fitur ini menjawab temuan Prasetyo *et al.* [4], yang menyatakan bahwa 60% kebakaran di TPST disebabkan oleh akumulasi metana yang tidak terdeteksi sehingga sistem berbasis deteksi langsung nyala api menjadi pelengkap penting dari pemantauan gas tidak langsung. Integrasi multi-sensor memungkinkan pendekatan *layered safety*:

- Tahap 1: Pemantauan gas berbahaya (CH_4 , NH_3 , H_2S),
- Tahap 2: Deteksi partikulat ($\text{PM}_{2.5}$),
- Tahap 3: Deteksi langsung nyala api.

Pendekatan ini meningkatkan ketahanan sistem terhadap *false negative*, sekaligus mempercepat respons mitigasi sesuai dengan prinsip *early warning system* dalam manajemen bencana lingkungan [18].

3.4. Peningkatan Kapasitas dan Keberdayaan Mitra

Berdasarkan kuesioner evaluasi yang diisi oleh responden utama (pengelola TPST), peningkatan keberdayaan mitra terukur secara kuantitatif:

1) Penerapan IPTEK:

- ✓ Sebelum PPM: 0% (tidak ada sistem IoT),
- ✓ Setelah PPM: 100% (sistem terpasang dan beroperasi penuh).

2) Penggunaan aplikasi Android:

- ✓ Sebelum PPM: Tidak digunakan,
- ✓ Setelah PPM: Digunakan aktif oleh seluruh pengelola.

3) Kemampuan mengoperasikan sistem:

- ✓ Sebelum PPM: 0% (tidak ada yang mampu),
- ✓ Setelah PPM: 100% (semua peserta terlatih).

Evaluasi kualitatif melalui skala Likert (1–4) menghasilkan skor rata-rata:

- ✓ Relevansi solusi: 3,33 (Sangat Baik),
- ✓ Peningkatan keterampilan: 3,50 (Sangat Baik),
- ✓ Kepuasan keseluruhan: 3,50 (Sangat Baik).

Nilai rata-rata keseluruhan 3,33 menunjukkan bahwa kegiatan dinilai sangat berhasil dalam meningkatkan kapasitas dan kemandirian mitra. Pendekatan IPTEKS Sosial Budaya (IPTEKS SB) melalui pelatihan berbahasa lokal dan keterlibatan aktif terbukti efektif dalam membangun ownership teknologi oleh pengelola [8].

3.5. Implikasi bagi Pengelolaan Sampah Berkelanjutan

Implementasi sistem ini tidak hanya menjawab kebutuhan teknis, tetapi juga mendukung tujuan kebijakan nasional sebagaimana diamanatkan dalam Peraturan Menteri LHK No. 12 Tahun 2020 [6]. Lebih jauh, sistem ini menjadi fondasi bagi konsep *smart waste management* di wilayah perkotaan Indonesia, di mana data lingkungan *real-time* dapat digunakan untuk:

- Perencanaan operasional harian (misalnya penjadwalan penyiraman untuk menekan debu),
- Dokumentasi emisi untuk pelaporan lingkungan,
- Peringatan dini kepada masyarakat sekitar melalui integrasi dengan sistem informasi desa.

4. KESIMPULAN

Kegiatan pengabdian kepada masyarakat ini berhasil mengimplementasikan sistem pemantauan kualitas udara dan deteksi dini kebakaran berbasis IoT di TPST Pandesari Sehati, Kabupaten Malang. Sistem terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32, sensor gas (CH₄, NH₃, H₂S), sensor PM2.5, dan sensor nyala api inframerah, serta terhubung ke platform *cloud* Firebase dan aplikasi Android.

Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu memantau parameter lingkungan secara *real-time* dengan akurasi tinggi sensor PM2.5 mencapai 97,73% akurasi dan memberikan respons cepat terhadap potensi bahaya melalui indikator visual, alarm suara, dan notifikasi digital. Uji coba lapangan membuktikan kemampuan sistem mendeteksi lonjakan PM2.5 hingga 249 µg/m³, yang secara otomatis memicu status BERBAHAYA.

Secara kuantitatif, penerapan IPTEK di mitra meningkat dari 0% menjadi 100%, dan 100% pengelola kini mampu mengoperasikan sistem setelah pelatihan. Evaluasi kuesioner menunjukkan tingkat kepuasan mitra mencapai 3,50 (Sangat Baik). Implementasi ini tidak hanya menjawab kebutuhan teknis sesuai regulasi nasional, tetapi juga menjadi langkah awal menuju *smart waste management* yang aman, cerdas, dan berkelanjutan di Indonesia.

5. SARAN

Berdasarkan hasil implementasi dan evaluasi kegiatan pengabdian, disarankan agar TPST Pandesari Sehati secara berkelanjutan melaksanakan pelatihan lanjutan dan pemeliharaan rutin, terutama bagi staf baru, serta melakukan kalibrasi ulang sensor setiap 3–6 bulan untuk menjaga akurasi dan keandalan sistem dalam jangka panjang. Selain itu, pengembangan sistem dengan menambahkan sensor pendukung seperti CO, CO₂, atau DHT22 (suhu dan kelembaban) dapat memperkaya data lingkungan dan meningkatkan efektivitas mitigasi risiko. Fitur aplikasi Android juga perlu ditingkatkan melalui penambahan visualisasi tren historis, laporan otomatis mingguan atau bulanan, serta integrasi dengan sirene lokal atau notifikasi darurat berbasis SMS. Untuk menjamin kontinuitas operasional selama gangguan listrik yang sering terjadi di daerah pedesaan sistem sebaiknya dilengkapi sumber daya cadangan seperti baterai berkapasitas tinggi atau panel surya. Terakhir, model ini sangat layak direplikasi di TPST atau Tempat Penampungan Sementara (TPS) lain di wilayah Malang Raya dan sekitarnya, dengan mendorong kolaborasi berkelanjutan antara perguruan tinggi, pemerintah daerah, dan masyarakat dalam skema *triple helix*, guna memperkuat ekosistem pengelolaan sampah yang cerdas, aman, berbasis data, dan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Malang yang telah memberikan bantuan dana kegiatan pengabdian ini melalui Dana DIPA Nomor SP DIPA-139.03.2.693474/2025 Politeknik Negeri Malang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Alyasi, H. S., & Isaifan, R., 2018. A review on pollution emissions and impact from waste treatment and disposal facilities. *Journal of Environmental and Toxicological Studies*, 2(1), 1-9.
- [2] Kumar, A., Singh, R., & Sharma, S. 2021. Methane

- emissions from landfill sites and their impact on climate change. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(15), 18234–18245. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12253-9>
- [3] Nur, M., Hidayat, F., & Wijaya, L., 2020. Toxic emissions from open burning of municipal solid waste in developing countries. *Waste Management & Research*, 38(7), 789–797. <https://doi.org/10.1177/0734242X20912345>
- [4] Prasetyo, B., Suryanto, D., & Wibowo, A., 2022. Early fire detection in landfill sites using methane sensors: A case study in Indonesia. *Fire Safety Journal*, 135, 103721. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103721>
- [5] Situmorang, R., Putra, A., & Siregar, E., 2019. Health and environmental impacts of open waste burning in urban areas. *Atmospheric Pollution Research*, 10(5), 1423–1430. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.04.003>
- [6] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia., 2020. *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 12 Tahun 2020 tentang Pengelolaan Sampah di TPST*.
- [7] Hartono, D., & Kusuma, A., 2023. Assessment of air quality monitoring systems in Indonesian waste processing facilities. *Environmental Policy Management Review*, 12(2), 45–59.
- [8] Tim Politeknik Negeri Malang., 2025, *Laporan pengabdian masyarakat: Implementasi sistem pemantauan kualitas udara dan deteksi dini kebakaran di TPST Pandesari Sehati*. Politeknik Negeri Malang.
- [9] Razzaque, M. A., Islam, S. N. M. N., & Mamun, S., 2021. IoT-based environmental monitoring systems: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(12), 9525–9548. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3048412>
- [10] Wicaksono, A., et al., 2023. IoT-based smart monitoring system for landfill safety: A pilot project in Malang City. *Proceedings of the International Conference on Smart Technology Applications*, 112–117.
- [11] Fatimah, Y. A., Govindan, K., Murniningsih, R., & Setiawan, A., 2020. Industry 4.0 based sustainable circular economy approach for smart waste management system to achieve sustainable development goals: A case study of Indonesia. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122263.
- [12] Afkarien, A. K., Astawa, I. G. P., & Nadziroh, F., 2025. Development of IoT-based smart waste management systems for organic and non-organic waste in smart cities. *The Indonesian Journal of Computer Science*, 14(2).
- [13] Figaro Engineering Inc., 2020, *MQ-4 methane sensor datasheet*. Figaro Engineering Inc.
- [14] Figaro Engineering Inc., 2021, *MQ-135 air quality sensor datasheet*. Figaro Engineering Inc.
- [15] Hanwei Electronics., 2019, *MQ-136 hydrogen sulfide sensor specification*. Hanwei Electronics.
- [16] Sharp Corporation., 2018. *GP2Y1010AU0F compact optical dust sensor*. Sharp Corporation.
- [17] Espressif Systems., 2022. *ESP32 technical reference manual*. Espressif Systems.
- [18] United Nations Office for Disaster Risk Reduction., 2022. *Global assessment report on disaster risk reduction: Early warning systems*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction.