

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Permasalahan sampah di Indonesia merupakan isu lingkungan yang terus meningkat dan menjadi tantangan serius bagi pemerintah dan masyarakat. Berdasarkan laporan Kementrian Lingkungan Hidup dan Kehutanan pada tahun 2025, Indonesia menghasilkan lebih dari 31 juta ton sampah dari total 183 kabupaten/kota, dengan sekitar 50% berasal dari rumah tangga. Berdasarkan jumlah berikut, hanya sekitar 33% yang berhasil dikelola dengan baik, sedangkan sisanya berakhir di lingkungan terbuka, sungai, atau bahkan dibakar secara tidak terkendali, dan pengurangan sampah hanya mencapai 1-2% (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2025). Kondisi ini memperlihatkan adanya kesenjangan besar antara volume sampah yang dihasilkan dan kapasitas sistem pengelolaan yang tersedia dengan baik, terutama di wilayah pemukiman.

Pada tingkat Rukun Warga, permasalahan sampah semakin nyata. Banyak Rukun Warga di Indonesia belum memiliki sistem pengelolaan sampah yang terorganisir, baik dalam hal pemilahan sampai pengolahan akhir. Akibatnya, masyarakat sering mengambil langkah cepat dengan membakar sampah secara terbuka untuk mengurangi volume sampah. Namun praktik ini justru menimbulkan pencemaran udara karena menghasilkan gas hasil pembakaran yang berbahaya seperti karbon monoksida, nitrogen oksida, sulfur dioksida yang berpotensi menyebabkan penyebaran penyakit dan mengganggu kualitas udara.

Dalam upaya menjaga kualitas udara dan mengurangi dampak pencemaran akibat aktivitas pembakaran limbah, pemerintah Indonesia melalui Kementrian Lingkungan Hidup dan Kehutanan telah menetapkan standar baku mutu emisi gas buang bagi fasilitas pembakaran limbah padat termasuk insinerator. Peraturan ini bertujuan untuk memastikan bahwa proses

pembakaran berlangsung secara aman dan tidak menimbulkan risiko terhadap lingkungan maupun kesehatan masyarakat. Berdasarkan ketentuan tersebut, emisi gas buang wajib memenuhi ambang batas maksimum untuk beberapa parameter utama, antara lain karbon monoksida (CO) sebesar 100 mg/Nm³, oksida nitrogen (NO_x) sebesar 400 mg/Nm³, sulfur dioksida (SO₂) sebesar 300 mg/Nm³, dan partikulat sebesar 180 mg/Nm³ (PERATURAN MENTERI LINGKUNGAN HIDUP DAN KEHUTANAN REPUBLIK INDONESIA NOMOR: P.70/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016). Keempat parameter ini menjadi indikator penting dalam menentukan kualitas proses pembakaran karena masing-masing berkontribusi terhadap pencemaran udara, baik melalui pembentukan asap beracun, hujan asam, maupun partikulat halus yang membahayakan kesehatan manusia.

Semakin bertambahnya jumlah penduduk akan berpengaruh pada pola konsumsi masyarakat yang berdampak pada bertambahnya volume, jenis dan karakteristik sampah yang dihasilkan. Jika sampah yang dihasilkan tidak dikelola dengan baik dan benar, tentu akan menimbulkan masalah lingkungan seperti, sampah yang berserakan di lahan kosong maupun di jalan, menimbulkan bau yang tidak sedap, mengakibatkan banjir karena sampah yang menumpuk dibantaran sungai, dan menumpuknya sampah di tempat pemrosesan akhir (TPA).

Menurut Safitri (2022) Selama ini, sebagian besar masyarakat masih menerapkan pola lama dalam pengelolaan sampah, yang berfokus pada sistem 3P yaitu pengumpulan, pengangkutan, dan pembuangan. Pendekatan tersebut dikenal sebagai solusi *end of pipe*, di mana sampah hanya dipindahkan dari satu tempat ke tempat lain tanpa melalui proses pengurangan atau pengolahan yang berarti. Seiring berjalannya waktu, sistem ini dinilai kurang efektif karena justru menyebabkan peningkatan volume sampah di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) dan menimbulkan berbagai permasalahan lingkungan, seperti pencemaran udara, bau tidak sedap, serta penurunan kualitas tanah dan air tanah di sekitar lokasi TPA.

Menurut Komarudin *et al.* (2023) permasalahan dalam pengelolaan sampah di Indonesia tidak hanya terletak pada aspek teknis pengumpulan dan pembuangan, tetapi juga pada lemahnya koordinasi dan komunikasi antar pelaksana kebijakan. Salah satu contohnya adalah tidak adanya kepastian jadwal pengangkutan sampah dari bank sampah di tingkat kelurahan, yang mengakibatkan terjadinya penumpukan sampah di lokasi sementara. Permasalahan koordinasi dan keterbatasan sumber daya dalam sistem pengelolaan sampah tersebut menunjukkan bahwa upaya penanganan tidak dapat hanya bergantung pada pemerintah daerah semata. Diperlukan adanya kolaborasi antara pemerintah, pelaku masyarakat, serta lembaga pengelola sampah lokal seperti bank sampah dan unit pengangkut. Pendekatan berbasis komunitas menjadi penting karena memberikan ruang bagi masyarakat untuk turut berpartisipasi dalam pengelolaan sampah dari sumbernya.

Selain itu, sistem pengelolaan yang tidak berbasis pemilahan juga memperburuk kondisi karena sampah organik dan anorganik tercampur, sehingga proses daur ulang menjadi sulit dilakukan. Sementara itu, tingkat partisipasi masyarakat dalam pengurangan sampah dari sumbernya masih tergolong rendah akibat keterbatasan sarana, edukasi, dan kesadaran lingkungan. Oleh sebab itu, dibutuhkan pendekatan baru yang lebih efektif dan berkelanjutan dalam menangani sampah, tidak hanya mengandalkan pengumpulan dan pembuangan, tetapi juga melibatkan proses reduksi volume sampah dan pengolahan di tingkat sumber.

Rendahnya partisipasi masyarakat, dan kurangnya penerapan teknologi ramah lingkungan semakin memperburuk kondisi tersebut. Sampah yang tidak terkelola dengan baik menjadi sumber berbagai persoalan mulai dari penurunan kualitas lingkungan, peningkatan emisi gas, hingga risiko kebakaran akibat pembakaran terbuka. Oleh karena itu, dibutuhkan strategi pengelolaan sampah yang lebih efektif, terintegrasi, dan berkelanjutan, yang tidak hanya berfokus pada pengumpulan dan pembuangan, tetapi juga pada proses reduksi, daur ulang, dan pengolahan di tingkat sumber. Pergeseran paradigma dari sistem konvensional menuju sistem pengelolaan modern

menjadi langkah penting untuk mendukung program nasional pengurangan sampah serta mewujudkan lingkungan permukiman yang bersih dan sehat.

Sebagai upaya pengendalian, beberapa daerah mulai mengimplementasikan teknologi *incinerator* skala kecil untuk membantu mengurangi volume sampah. Di Indonesia, keberadaan *incinerator* atau alat pembakar sampah skala kecil sering diadopsi sebagai alternatif pengurangan volume sampah, dengan kemampuan mengurangi hingga 90% volume sampah melalui proses pembakaran bersuhu tinggi (Sumaryo, 2024). Keunggulan utama *incinerator* adalah kemampuannya dalam mengolah berbagai jenis sampah tanpa perlu proses pemilahan sampah yang rumit. Namun, penggunaan *incinerator* di tingkat komunitas sering kali menghadapi berbagai kendala, mulai dari ketidakteraturan suhu pada saat pembakaran dan ketiadaan sistem pemantauan suhu dan emisi pada gas buang. Operasi *incinerator* yang tidak terkontrol justru mengakibatkan sumber polusi baru.

Penggunaan *incinerator* dengan sistem pembakaran minim asap merupakan salah satu inovasi ramah lingkungan yang dapat menjadi alternatif sehat dibandingkan metode pembakaran terbuka (*open burning*). Proses pembakaran terbuka diketahui menghasilkan berbagai zat toksik seperti karbon monoksida (CO), benzena, dan formaldehida yang berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan serta mencemari udara di lingkungan sekitar (Gucella *et al.*, 2025). Inovasi insinerator modern dirancang dengan sistem sirkulasi udara ganda yang memungkinkan terjadinya pembakaran lebih sempurna, sehingga jumlah asap dan partikel berbahaya yang dihasilkan dapat ditekan secara signifikan.

Salah satu masalah teknis yang dihadapi pada penggunaan *incinerator* skala komunitas adalah tidak adanya sistem pemantauan secara real time terhadap kondisi operasional alat. Proses pemantauan umumnya dilakukan secara manual oleh operator tanpa bantuan perangkat pengukur, sehingga rentan terhadap *human error* dan data yang tidak akurat. Temperatur pembakaran yang tidak stabil dapat menyebabkan pembentukan gas dan partikel yang dapat membahayakan kesehatan manusia maupun lingkungan

dan operator tidak dapat memastikan apakah *incinerator* bekerja sesuai dengan batas emisi aman yang ditetapkan oleh peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. P70 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Emisi Kegiatan Pengelolaan Sampah.

Teknologi *Internet of things (IoT)* merupakan teknologi yang dapat menjadi solusi untuk memungkinkan sistem pemantauan berjalan otomatis dan berkesinambungan. *Internet of things* adalah konsep yang menghubungkan berbagai perangkat fisik seperti sensor, mikrokontroler, dan jaringan komunikasi ke internet, sehingga data dapat dikirim, disimpan, dan dipantau secara *real time*. Melalui teknologi ini, *incinerator* dapat dilengkapi dengan sensor suhu untuk memantau tingkat panas pembakaran, serta sensor gas untuk mendeteksi kadar gas buang yang berbahaya.

Studi dari (Sumaryo, 2024) dan (Arkhan & Elsi, 2024) menunjukkan bahwa penggunaan sensor berbasis IoT seperti MQ-7, MQ-135, dan *thermocouple* mampu meningkatkan efektivitas *monitoring* dan kontrol *incinerator* secara *real-time* dengan biaya relatif murah dan kepraktisan tinggi. Namun, penelitian juga mengidentifikasi adanya gap teknologi pada implementasi skala kecil yang memerlukan solusi yang lebih sederhana dan terjangkau namun tetap efektif. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada pengembangan sistem *monitoring* berbasis IoT yang terintegrasi dengan sensor gas dan suhu khusus untuk *incinerator* skala komunitas. Diharapkan sistem ini dapat meningkatkan efektivitas pengelolaan sampah, menjaga kualitas lingkungan, serta menyediakan kemudahan dalam pengendalian dan pemeliharaan operasional *incinerator*.

Sebagian besar penelitian yang telah dilakukan masih berfokus pada *incinerator* industri dan laboratorium yang membutuhkan sumber daya besar dan infrastruktur digital memadai. Dalam lingkup skala Rukun Warga, penerapan sistem berbasis *Internet of things* masih menghadapi kendala seperti keterbatasan biaya, pengetahuan teknis masyarakat, serta kondisi lingkungan yang variatif. Oleh karena itu, dibutuhkan penelitian terapan yang berorientasi pada rancangan sistem *monitoring* sederhana, efektif, dan

ekonomis namun tetap akurat dan dapat diandalkan untuk digunakan di tingkat komunitas atau Rukun Warga.

1.2 Identifikasi Masalah

Belum adanya sistem monitoring berbasis IoT yang mampu memantau temperatur ruang bakar dan emisi gas buang pada incinerator skala komunitas secara *real-time*. Akibatnya, operator masih melakukan pemantauan secara manual sehingga kondisi pembakaran sulit dievaluasi secara cepat dan akurat. Menimbulkan pertanyaan-pertanyaan sebagai berikut:

- Bagaimana sistem pemantauan kondisi operasional *incinerator* skala komunitas dapat dilakukan secara *real-time*, tepat, dan konsisten?
- Mengapa proses pengawasan *incinerator* yang masih dilakukan secara manual berpotensi menimbulkan ketidakakuratan data dan meningkatkan dampak terhadap lingkungan?
- Bagaimana pengaruh sistem monitoring yang masih manual dan belum terintegrasi terhadap kemampuan operator dalam mendeteksi kondisi operasional *incinerator*?
- Bagaimana penerapan teknologi *Internet of Things* (IoT) yang sesuai dengan kondisi dan keterbatasan sumber daya pada *incinerator* skala komunitas?
- Mengapa mekanisme pemantauan terhadap parameter operasional *incinerator* masih belum mampu mendukung pengawasan kondisi operasi secara optimal?
- Bagaimana mengembangkan sistem monitoring pada *incinerator* skala komunitas yang sederhana, terjangkau, dan tetap efektif untuk diterapkan?
- Bagaimana merancang sistem monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT) yang mengintegrasikan sensor temperatur dan sensor gas untuk memenuhi kebutuhan operasional *incinerator* skala komunitas?

1.3 Pembatasan Masalah

Penelitian ini dibatasi pada pengembangan sistem integrasi sensor *monitoring* berbasis *Internet of things* (IoT) yang diterapkan pada *incinerator* skala Rukun Warga dengan fokus sebagai berikut:

- Penelitian ini hanya memfokuskan pada perancangan dan implementasi sistem *monitoring* berbasis IoT yang terintegrasi dengan sensor suhu dan sensor gas pada *incinerator* skala komunitas.
- Pengembangan sistem dan pengujian dilakukan pada *incinerator* skala komunitas meliputi Suhu, CO, NO_x, SO₂.

1.4 Perumusan Masalah

Berdasarkan pembatasan ruang lingkup pembahasan diatas, maka yang akan dijawab dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

- Bagaimana merancang sistem *monitoring* berbasis IoT yang mampu membaca dan menampilkan data suhu ruang bakar serta kadar gas hasil pembakaran pada *incinerator* skala komunitas secara *real-time*?
- Bagaimana perangkat lunak dan *platform Cloud* IoT dapat digunakan untuk mengirimkan dan menampilkan data hasil pengukuran dalam bentuk visualisasi?

1.5 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Merancang sistem *monitoring* berbasis IoT yang mampu membaca dan menampilkan data suhu ruang bakar serta kadar gas hasil pembakaran pada *incinerator* skala komunitas secara *real-time*.
- Mengintegrasikan sensor digital dalam sistem IoT sehingga data hasil *monitoring* dapat diakses secara mudah dan akurat oleh pengelola *incinerator* di tingkat komunitas melalui perangkat digital.

1.6 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

- Secara Teoritis

Penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan khususnya pada bidang teknik mesin, sistem kendali, dan teknologi *Internet of things (IoT)*. Rancangan sistem integrasi antara sensor suhu dan sensor gas pada *incinerator* dapat memperbanyak kajian ilmiah mengenai pemanfaatan teknologi digital untuk mendukung sistem *monitoring* berbasis data. Studi ini bertujuan menawarkan kontribusi signifikan terhadap teori dengan meningkatkan wawasan tentang bagaimana teknologi *Internet of things (IoT)* dapat diterapkan untuk memantau dan mengendalikan *incinerator* yang beroperasi pada lingkungan komunitas.

Melalui penggabungan sensor untuk mendeteksi suhu dan gas berbahaya, penelitian ini membuktikan secara ilmiah bahwa pemantauan proses pembakaran dan pengawasan emisi secara langsung (*real-time*) dapat dilakukan secara efektif, mengatasi keterbatasan yang umum terjadi pada *incinerator* berkapasitas kecil. Secara konseptual, hasil riset ini dapat dijadikan referensi untuk merancang sistem serupa dan mendorong eksplorasi lebih jauh dalam pengembangan teknologi pengelolaan limbah yang memanfaatkan IoT dan konsep *smart city*.

- Secara Implementatif

Sistem *monitoring* IoT ini merupakan solusi praktis bagi pengelola *incinerator* komunitas untuk mengontrol dan memantau pembakaran secara efisien dan tepat. Sistem ini secara efektif mengeliminasi risiko kesalahan manual, menjamin keamanan operasional, dan mengendalikan emisi gas berbahaya, sehingga berkontribusi pada kualitas udara dan kesehatan publik. Keunggulan lain, teknologi ini mudah diakses dan diaplikasikan oleh komunitas yang memiliki keterbatasan sumber daya, memberikan nilai tambah segera untuk pengelolaan sampah komunal yang berkelanjutan.

- Aspek Sosial

Penelitian ini berkontribusi terhadap peningkatan kesadaran masyarakat akan pentingnya teknologi ramah lingkungan dalam pengelolaan sampah. Melalui penerapan sistem *monitoring* ini, masyarakat Rukun Warga dapat lebih memahami dampak dari pembakaran sampah yang tidak terkontrol terhadap lingkungan dan kesehatan. Sistem ini juga mendorong partisipasi aktif masyarakat dalam menjaga kebersihan lingkungan, memperkuat kolaborasi antara warga dan pengelola dalam mengawasi operasional *incinerator*, serta menumbuhkan budaya teknologi dan inovasi di tingkat komunitas.

Sistem ini diharapkan mampu menekan dampak pencemaran udara akibat pembakaran terbuka. Dengan adanya pemantauan suhu dan kadar gas berbahaya secara kontinu, proses pembakaran dapat dijaga agar tetap optimal dan emisi gas buang berbahaya dapat dikontrol di bawah ambang batas aman. Hal ini secara langsung berkontribusi terhadap peningkatan kualitas udara dan kesehatan masyarakat. Selain itu, penerapan *incinerator* yang lebih efisien dan ramah lingkungan turut mendukung konsep *Sustainable Waste Management* serta membantu pemerintah dalam mewujudkan target pengurangan emisi karbon nasional.