

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pencemaran Udara

2.1.1 Definisi Pencemaran Udara

Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, pencemaran udara adalah masuknya atau dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen lain ke udara ambien oleh kegiatan manusia, sehingga mutu udara turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak dapat memenuhi fungsinya.

WHO (2021) mendefinisikan pencemaran udara sebagai kondisi ketika udara mengandung bahan berbahaya, baik dalam bentuk partikel maupun gas, yang dapat menimbulkan risiko bagi kesehatan manusia maupun ekosistem.

2.1.2 Sumber Pencemaran Udara dalam Ruangan

Sumber pencemar udara dapat dibedakan menjadi pencemar luar ruang dan dalam ruang. Dalam ruang, sumber utama pencemar berasal dari aktivitas manusia, antara lain:

- a. pembakaran bahan bakar untuk memasak,
- b. asap rokok,
- c. penggunaan bahan pembersih, serta pembakaran bahan padat seperti kayu atau kertas (Nazaroff, 2013).

Dalam penelitian ini, pencemar udara disimulasikan menggunakan pembakaran kardus telur, karena menghasilkan asap pekat dengan kadar partikulat tinggi yang dapat merepresentasikan kondisi udara tercemar dalam ruang.

2.1.3 Dampak Pencemaran Udara terhadap Kesehatan

Paparan polutan udara, terutama partikel padat seperti *PM10*, dapat menimbulkan dampak akut maupun kronis pada kesehatan manusia. Menurut WHO (2021). Pencemaran udara menjadi penyebab sekitar 7 juta kematian dini setiap tahun di dunia. Secara khusus, *PM10* dapat masuk ke saluran pernapasan bawah dan menimbulkan gangguan kesehatan berupa ISPA, asma, bronkitis, serta peningkatan risiko penyakit paru obstruktif kronis (PPOK) (Kridawati, 2019).

Penelitian Zhang et al. (2023) juga menunjukkan bahwa paparan jangka panjang *PM10* meningkatkan risiko penyakit kardiovaskular, kanker paru, dan penurunan fungsi paru.

2.2 Pengertian dan Karakteristik PM10

Particulate Matter (PM) adalah campuran partikel padat dan cairan yang berada di udara. *PM* diklasifikasikan berdasarkan ukuran aerodinamikanya, salah satunya *PM10*, yaitu partikel dengan diameter ≤ 10 mikrometer (μm). *PM10* termasuk kategori *inhalable particles*, yang dapat terhirup hingga ke saluran pernapasan bawah (WHO, 2021). Karakteristik *PM10* antara lain berukuran kecil, ringan, dapat

bertahan lama di udara, dan mampu berpindah jauh dari sumber emisinya (Seinfeld & Pandis, 2016).

2.2.1 Sumber *PM10*

- a. Sumber utama *PM10* dapat berasal dari proses alami maupun aktivitas manusia.
- b. Sumber alami: debu tanah, abu vulkanik, serbuk sari, dan partikel laut.
- c. Sumber antropogenik: pembakaran biomassa, asap kendaraan bermotor, industri, serta pembakaran sampah rumah tangga (Nazaroff, 2013).

Dalam penelitian ini, pembakaran kardus telur digunakan sebagai simulasi pencemar. Kardus telur berbahan dasar serat selulosa yang ketika dibakar menghasilkan asap pekat dengan kandungan partikulat tinggi, sehingga sesuai digunakan sebagai model polusi udara dalam ruang uji.

2.2.2 Dampak *PM10* terhadap Kesehatan

Paparan *PM10* dapat menimbulkan efek kesehatan baik akut maupun kronis. Menurut WHO (2021), *PM10* berkontribusi besar terhadap penyakit pernapasan dan kardiovaskular.

Dampak akut: iritasi saluran pernapasan, batuk, sesak napas, serangan asma, dan peningkatan kasus ISPA (Kridawati, 2019).

Dampak kronis: peningkatan risiko PPOK, kanker paru-paru, dan penyakit jantung koroner. Studi Zhang et al. (2023) menunjukkan

bahwa paparan jangka panjang terhadap *PM10* berkorelasi dengan peningkatan mortalitas akibat penyakit kardiopulmoner.

2.2.3 Standar Baku Mutu *PM10*

- a. Baku mutu *PM10* ditetapkan untuk melindungi kesehatan manusia dari dampak pencemaran udara.
- b. WHO (2021): batas aman rata-rata harian $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan rata-rata tahunan $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- c. Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021: baku mutu udara ambien nasional untuk *PM10* adalah $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (rata-rata harian) dan $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (rata-rata tahunan).

Perbedaan standar ini menunjukkan bahwa regulasi nasional masih lebih longgar dibanding rekomendasi WHO. Hal ini menjadi alasan pentingnya penelitian dan inovasi teknologi sederhana untuk mengurangi konsentrasi *PM10*, terutama di lingkungan rumah tangga.

2.3 Teknologi Penyaringan Udara

Berbagai teknologi telah dikembangkan untuk menurunkan konsentrasi partikulat udara. Masing-masing memiliki prinsip kerja, kelebihan, dan keterbatasan tersendiri. Penelitian ini mengadopsi tiga teknologi penyaringan utama, yaitu *cyclone separator (setrifugal)*, *Baffle/Blade Filter* (filter bilah), dan *wet scrubber* (media air).

2.3.1 *Cyclone Separator (Sistem Sentrifugal)*

Cyclone separator adalah alat pemisah partikel dari aliran udara menggunakan prinsip gaya sentrifugal. Aliran udara dipaksa masuk

secara spiral sehingga partikel yang memiliki massa lebih besar terdorong ke dinding dan terpisah dari udara bersih.

Menurut Wark & Warner (2001), *cyclone separator* efektif menyaring partikel berukuran $>10 \mu\text{m}$, namun efisiensinya menurun untuk partikel yang lebih halus. Meski demikian, teknologi ini populer karena desain sederhana, biaya rendah, dan mudah dioperasikan.

2.3.2 Filter Bilah (*Baffle Filter*)

Filter bilah merupakan sistem penyaringan mekanik yang terdiri dari bilah-bilah pengarah aliran udara. Udara yang melewati bilah mengalami perubahan arah mendadak, sehingga partikel terlempar dan menempel pada permukaan bilah melalui mekanisme impaksi.

Kim et al. (2023) melaporkan bahwa penggunaan *baffle filter* dapat meningkatkan efisiensi penyaringan terutama untuk partikel berukuran menengah, karena adanya peningkatan turbulensi dan tumbukan. Kelebihan teknologi ini adalah struktur sederhana dan minim biaya, namun perlu perawatan berkala agar bilah tidak tersumbat partikel.

2.3.3 *Wet Scrubber* (Media Air)

Wet scrubber adalah alat penyaring udara yang menggunakan media cair (umumnya air) untuk menangkap partikel. Aliran udara yang terkontaminasi dialirkan melewati atau bersentuhan dengan air sehingga partikel halus menempel dan terjebak. Seinfeld & Pandis (2016) menjelaskan bahwa *wet scrubber* efektif menurunkan

konsentrasi partikulat halus (*PM10* bahkan *PM2.5*), sekaligus mampu menangkap sebagian gas terlarut dalam air. Kelemahannya adalah diperlukan pengelolaan limbah cair dari hasil penangkapan partikel.

2.3.4 Kelebihan dan Keterbatasan Teknologi

- a. *Cyclone Separator* → kuat, murah, tapi lemah untuk partikel halus.
- b. *Filter Bilah* → sederhana, meningkatkan impaksi, tapi butuh pembersihan rutin.
- c. *Wet Scrubber* → efektif untuk partikel halus, tapi menghasilkan limbah cair.

Ketiga teknologi ini bila dikombinasikan diharapkan dapat menghasilkan alat penyaring udara sederhana, efektif, dan terjangkau, sehingga cocok untuk penggunaan dalam rumah tangga sebagai upaya pencegahan dampak kesehatan akibat paparan *PM10*.

2.4 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai teknologi penyaringan udara telah dilakukan oleh berbagai peneliti dengan fokus pada mekanisme mekanik, cair, maupun kombinasi. Beberapa penelitian yang relevan antara lain:

Kim et al. (2023) meneliti peningkatan *kinerja baffle filter* dalam mengurangi polusi udara dalam ruangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan desain bilah dapat meningkatkan efisiensi

penangkapan partikel sebesar 7–25%, terutama untuk partikel berukuran menengah (Kim, Kim, Kwac, & Ko, 2023).

United States Environmental Protection Agency (EPA, 2020) menjelaskan bahwa *wet scrubber* merupakan salah satu metode pengendalian pencemaran udara yang efektif untuk menangkap partikel berukuran halus, termasuk *PM10* dan *PM2.5*. Namun, teknologi ini menghasilkan limbah cair yang harus dikelola dengan baik.

Liu et al. (2017) meneliti penggunaan *cyclone separator* skala kecil dalam industri pengolahan kayu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *cyclone* dapat mengurangi konsentrasi debu hingga 70%, meskipun kurang optimal dalam menangkap partikel berukuran sangat halus.

Dari beberapa penelitian di atas dapat disimpulkan bahwa masing-masing teknologi memiliki kelebihan dan keterbatasan. Belum banyak penelitian yang mengintegrasikan *cyclone separator*, *baffle filter*, dan *wet scrubber* ke dalam satu sistem sederhana. Penelitian ini berusaha mengisi gap tersebut dengan mengembangkan alat penyaring udara berbasis kombinasi ketiga sistem, serta mengujinya pada ruang rumah tangga dengan simulasi pencemar berupa pembakaran kardus telur.

2.5 Hakikat Penelitian Pengembangan

2.5.1 Konsep Penelitian Pengembangan

Penelitian pengembangan (*research and development*) merupakan metode penelitian yang bertujuan untuk menghasilkan produk tertentu serta menguji keefektifannya. Produk yang dimaksud

dapat berupa media, alat, atau sistem yang dapat digunakan untuk memecahkan masalah di lapangan (Sugiyono, 2019). Dalam bidang kesehatan lingkungan, penelitian pengembangan sering diterapkan untuk merancang alat sederhana yang dapat membantu mengurangi faktor risiko kesehatan masyarakat, misalnya alat penyaring udara, pengolahan limbah, maupun teknologi sanitasi tepat guna.

2.5.2 Model *ADDIE*

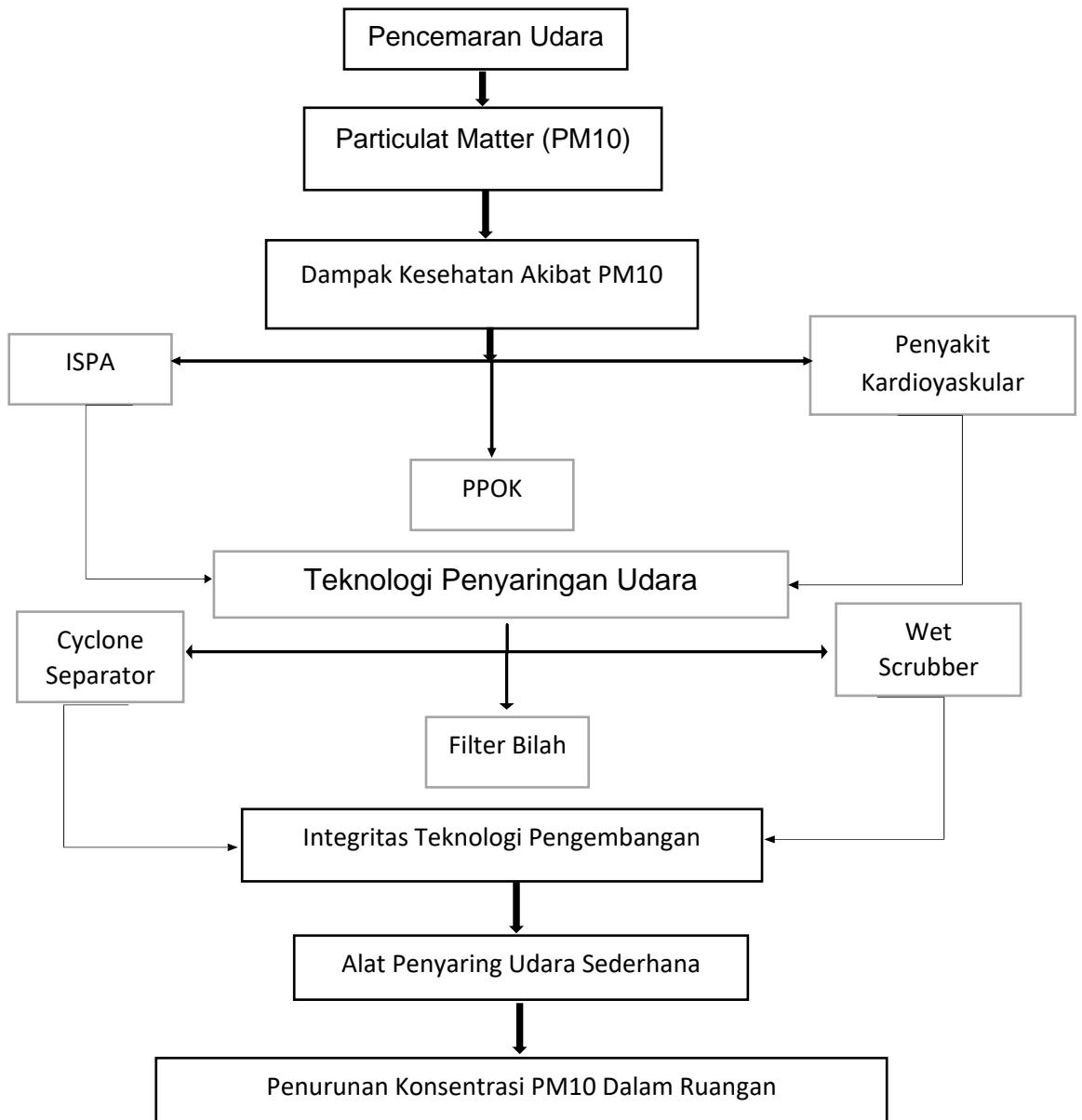
Model *ADDIE* (*Analysis, Design, Development, Implementation, and Evaluation*) merupakan salah satu model penelitian pengembangan yang banyak digunakan karena strukturnya sederhana dan sistematis (Branch, 2009).

- a. *Analysis* → menganalisis kebutuhan, masalah, dan tujuan pengembangan.
- b. *Design* → merancang produk/prototipe berdasarkan analisis kebutuhan.
- c. *Development* → membuat dan menguji prototipe alat sesuai rancangan.
- d. *Implementation* → menerapkan produk dalam skala terbatas.
- e. *Evaluation* → mengevaluasi efektivitas produk, baik secara formatif maupun sumatif.

Menurut Molenda (2015), kelebihan model *ADDIE* adalah fleksibel, dapat diterapkan dalam berbagai bidang termasuk

pendidikan dan kesehatan, serta memungkinkan peneliti untuk melakukan revisi pada setiap tahap. Dalam penelitian ini, model *ADDIE* digunakan sebagai dasar dalam pengembangan alat penyaring udara berbasis *cyclone separator*, filter bilah, dan *wet scrubber*, yang diuji efektivitasnya menurunkan konsentrasi *PM10* pada ruang rumah tangga.

2.6 Kerangka Teori



Bagan 2.1 Kerangka Teori

(Sumber : (Seinfeld & Pandis, 2016; WHO, 2021)).