

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis/Desain Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan adalah penelitian pengembangan (*Research and Development/R&D*), yaitu metode penelitian yang digunakan untuk menghasilkan produk tertentu serta menguji keefektifannya (Sugiyono, 2019). Produk dalam penelitian ini berupa alat penyaring udara sederhana berbasis kombinasi *cyclone separator*, filter bilah, dan *wet scrubber* (media air) untuk menurunkan konsentrasi partikulat udara berukuran ≤ 10 mikrometer (*PM10*) di ruang rumah tangga.

Model pengembangan yang digunakan adalah *ADDIE* (*Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation*). Model ini dipilih karena bersifat sistematis, sederhana, dan fleksibel dalam mengarahkan peneliti untuk merancang, membuat, mengimplementasikan, serta mengevaluasi produk (Branch, 2009; Molenda, 2015). Penerapan model *ADDIE* dalam penelitian ini meliputi:

- a. *Analysis* → menganalisis kebutuhan dan permasalahan pencemaran udara dalam ruang rumah tangga.
- b. *Design* → merancang prototipe alat penyaring udara dengan mengombinasikan mekanisme *cyclone separator*, filter bilah, dan *wet scrubber*.

c. *Development* → membangun prototipe alat serta melakukan uji coba awal.

d. *Implementation* → menerapkan alat pada ruang rumah tangga sebagai lokasi simulasi.

e. *Evaluation* → mengevaluasi efektivitas alat dalam menurunkan konsentrasi *PM10* berdasarkan hasil pengukuran sebelum dan sesudah penggunaan alat.

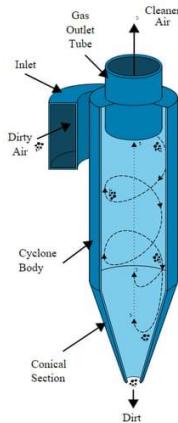
Dengan demikian, desain penelitian ini tidak hanya menghasilkan produk berupa alat penyaring udara, tetapi juga memberikan gambaran efektivitas penggunaannya untuk tujuan kesehatan lingkungan.

3.1.1 *Analysis*

Tahap analisis dilakukan untuk mengidentifikasi masalah, kebutuhan, serta dasar pengembangan alat. Kualitas udara dalam ruangan (*indoor air quality*) sangat berpengaruh terhadap kesehatan masyarakat, khususnya pada ruang rumah tangga yang aktivitasnya berpotensi menghasilkan partikulat halus. *Particulate Matter* berukuran ≤ 10 mikrometer (*PM10*) menjadi salah satu polutan utama yang dapat masuk ke saluran pernapasan bawah dan menimbulkan berbagai gangguan kesehatan, seperti ISPA, bronkitis, PPOK, hingga penyakit kardiovaskular (WHO, 2021; Zhang et al., 2023). WHO (2021) bahkan menegaskan bahwa tidak ada tingkat paparan partikulat yang benar-benar aman bagi kesehatan. Salah satu

sumber pencemar partikulat di rumah tangga berasal dari aktivitas pembakaran bahan padat, misalnya kayu bakar, arang, maupun limbah kertas dan kardus.

Menurut Smith et al. (2014), pembakaran bahan padat di dalam rumah tangga menyumbang konsentrasi partikulat yang signifikan dan menjadi penyebab penting beban penyakit global akibat polusi udara dalam ruangan. Berbagai teknologi penyaringan udara telah dikembangkan, namun sebagian besar ditujukan untuk skala industri. *Cyclone separator* (sistem sentrifugal) banyak dipakai dalam industri semen, kayu, dan tambang karena efektif memisahkan partikel kasar dengan biaya rendah (Wark & Warner, 2001).



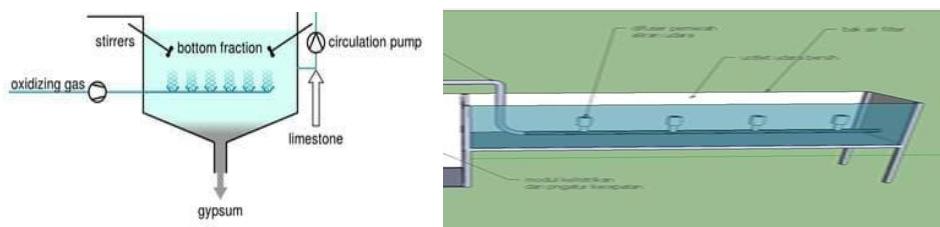
Gambar 3.1 cyclone separator

Filter bilah (*baffle filter*) umumnya digunakan dalam sistem ventilasi atau dapur industri untuk meningkatkan efisiensi penyaringan melalui mekanisme impaksi (Kim et al., 2023).



Gambar 3.2 baffle filter

Wet scrubber berbasis media cair juga lazim digunakan di industri besar untuk menangkap partikulat halus maupun gas terlarut (EPA, 2020).



Gambar 3.3 Wet scrubber

Namun, ketiga teknologi tersebut jarang diadopsi untuk skala rumah tangga. Padahal, masing-masing teknologi memiliki kelebihan dan keterbatasan: *cyclone* efektif untuk partikel kasar tetapi kurang optimal untuk partikel halus; filter bilah sederhana dan meningkatkan impaksi partikel menengah, namun memerlukan pembersihan rutin; *wet scrubber* efektif untuk partikel halus tetapi menghasilkan limbah cair yang harus dikelola. Berdasarkan analisis tersebut, penelitian ini mengembangkan alat penyaring udara sederhana dengan mengintegrasikan ketiga teknologi (*cyclone separator*, filter bilah,

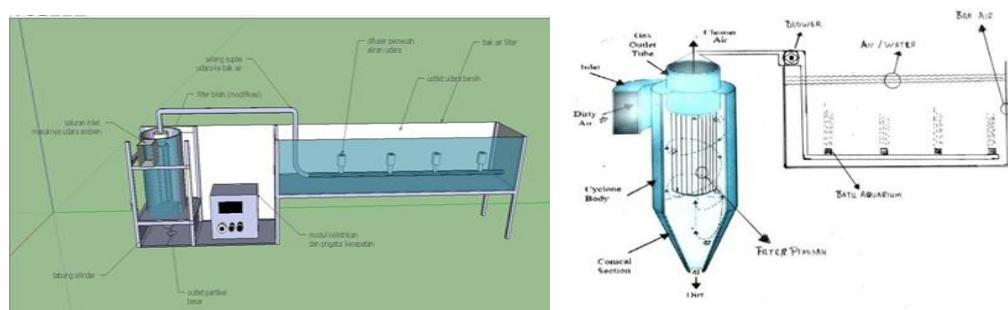
dan *wet scrubber*). Kombinasi ini diharapkan mampu menutupi kelemahan masing-masing sistem sehingga menghasilkan penyaringan yang lebih efektif pada skala rumah tangga.

3.1.2 *Design*

a. Rancangan Fisik Alat

Alat dirancang dalam casing (cover) berbentuk *box* yang dibagi menjadi dua bagian dalam ruang utama:

- 1) Ruang silinder (vertikal memanjang) untuk proses pemisahan partikel dengan mekanisme *cyclone* (sentrifugal) dan baffle filter di bagian dalamnya;
 - 2) Ruang kontrol (melebar, rendah) untuk kelistrikan (suplai daya, dimmer/pengatur daya).
 - 3) Di bagian luar, tepat di atas ruang kontrol, ditempatkan bak media air (*wet scrubber*) berbentuk kotak.



Gambar 3.4 Rancangan Fisik Alat

b. Alur Udara/Proses

Urutan proses aliran udara adalah:

Blower → (*Cyclone* + *baffle filter* di dalam tabung) → *Wet scrubber* (media air + *diffuser*) → Udara keluar.

- 1) Udara tercemar masuk melalui blower menuju tabung silinder, di sini aliran dipaksa berputar (spiral) sehingga partikel bermassa lebih besar terdorong ke dinding dan jatuh ke outlet bawah (prinsip pemisahan sentrifugal).
- 2) Di bagian tengah tabung silinder, terpasang *baffle filter* (filter bilah) yang menyebabkan perubahan arah aliran mendadak sehingga partikel berukuran menengah mengalami impaksi/penumbukan pada permukaan bilah dan terlepas dari aliran.
- 3) Udara yang telah berkurang partikelnya ditarik ke atas melalui rongga pipa $\frac{3}{4}$ inci, kemudian dialirkan ke bak media air.
- 4) Di *wet scrubber*, udara digelembungkan/dipaksa kontak melalui *diffuser* dasar bak sehingga butiran air menangkap partikulat (agregasi/penjeratan), lalu udara keluar dari bak sebagai udara yang lebih bersih.

c. Spesifikasi Komponen

- 1) Tabung silinder: pipa PVC (PFC) diameter 4 inci, tinggi ± 35 cm; aliran memutar ke bawah (*downward swirl*).
- 2) *Baffle filter* (filter bilah): bahan karton 3 mm dipotong memanjang seperti bilah dan disusun menyerong berjarak

mengelilingi pipa $\frac{3}{4}$ inci secara vertikal, diletakkan tepat di tengah ruang silinder; jarak 5 cm dari outlet pengendapan partikel berat.

3) *Wet scrubber* (media air): bak kaca ukuran T 21 cm x L 19 cm x P 24 cm, dilengkapi *diffuser* di dasar untuk memecah aliran dan meningkatkan kontak udara–air.

Penggerak aliran:

- 1) 2 dinamo *jet fan* sebagai *blower* awal (udara masuk ke silinder),
- 2) 4 pompa portabel tipe galon terhubung selang menuju *diffuser* untuk mendorong aliran ke sistem media air.

d. Dasar Teoretis Desain

Tahap *cyclone*/sentrifugal. Pada *cyclone separator*, aliran berputar menghasilkan gaya sentrifugal yang melempar partikel bermassa lebih besar ke dinding dan menuju *hopper/outlet* bawah; efisien untuk partikel $>10 \mu\text{m}$, menurun untuk yang lebih halus (Wark & Warner, 2001; Seinfeld & Pandis, 2016).

Tahap *baffle*/impaksi. *Baffle filter* menambah perubahan arah & turbulensi sehingga partikel menengah cenderung mengimpaksi permukaan bilah; desain bilah dapat meningkatkan efisiensi koleksi (Kim et al., 2023).

Tahap *wet scrubbing*/kontak dengan air. *Wet scrubber* menangkap partikel melalui impaksi pada permukaan cair,

intersepsi, dan difusi (terutama untuk partikel lebih kecil), dengan performa sangat bergantung pada intensitas kontak (ukuran gelembung, kecepatan, dan luas permukaan) (EPA, 2020; Seinfeld & Pandis, 2016; Hinds, 1999).

Kombinasi sentrifugal → impaksi bilah → kontak air dirancang untuk menutupi kelemahan masing-masing tahap: *cyclone* mengurangi beban partikel kasar di hulu, *baffle* menekan fraksi menengah, dan *wet scrubber* meningkatkan peluang penjeratan partikulat sisa (termasuk fraksi halus *PM10*). Pendekatan multistage seperti ini lazim digunakan agar efektivitas total meningkat tanpa harus menaikkan beban tekanan (*pressure drop*) berlebihan pada satu tahap saja (Seinfeld & Pandis, 2016).

3.1.3 *Development*

Tahap pengembangan (*development*) bertujuan untuk merealisasikan rancangan desain menjadi prototipe alat penyaring udara sederhana. Proses ini dilakukan melalui perakitan komponen utama, uji fungsi awal, dan perbaikan jika diperlukan

a. Bahan dan Komponen

Komponen utama yang digunakan meliputi:

1) Tabung silinder (*cyclone separator*)

Bahan: pipa PVC (PFC) berdiameter 4 inci, tinggi ± 35 cm.

Fungsi: sebagai ruang pemisahan partikel dengan gaya sentrifugal.



Gambar 3.5 Tabung silinder (*cyclone separator*)

2) *Baffle filter* (filter bilah)

Bahan: karton tebal 3 mm dipotong memanjang.

Penyusunan: bilah dipasang menyerong dengan jarak tertentu mengelilingi pipa $\frac{3}{4}$ inci secara vertikal, ditempatkan di bagian tengah tabung silinder. Fungsi: meningkatkan impaksi partikel berukuran sedang sehingga lebih mudah terlepas dari aliran udara.



Gambar 3.6 *Baffle filter* (filter bilah)

3) *Wet scrubber* (media air)

Bahan: bak kaca berukuran T 21 cm x L 19 cm x P 24 cm.

Perlengkapan: diffuser di dasar bak untuk memecah aliran udara menjadi gelembung halus.

Fungsi: memungkinkan kontak optimal udara dengan air sehingga *PM10* halus dapat terikat pada media cair.



Gambar 3.7 Wet scrubber (media air)

4) Penggerak aliran udara

- a) 2 unit dinamo jet fan untuk mendorong udara masuk ke dalam silinder.
- b) 4 unit pompa portabel tipe galon untuk mendorong aliran udara menuju *diffuser* dasar bak air.

5) Casing (cover alat)

- a) Bahan: papan/kotak penutup.
 - b) Desain: terdiri atas dua ruang dalam (ruang silinder dan ruang kontrol kelistrikan) serta satu bagian luar (bak media air).
- b. Tahapan Perakitan

- 1) Pembuatan *cyclone separator*
 - a) Tabung silinder PVC disiapkan dengan inlet pada sisi atas untuk masuknya udara.
 - b) Bagian bawah dibuat outlet partikulat dari soket *reducer* yang mengerucut agar partikel kasar dapat terendapkan, dan jatuh kebawah.
- 2) Pemasangan *baffle filter*
 - a) Bilah karton dipasang menyerong mengelilingi pipa $\frac{3}{4}$ inci secara vertikal.
 - b) Bagian bawah filter diberi jarak ± 5 cm dari *outlet* tabung.
 - c) *Jet fan* dipasang sebagai *blower* awal.
- 3) Pembuatan *wet scrubber*
 - a) Bak kaca dirakit dan dipasang *diffuser* di bagian dasar.
 - b) Selang dari pompa portabel dihubungkan ke *diffuser*.
 - c) Integrasi sistem kelistrikan
 - d) Pompa portabel dihubungkan ke sumber daya listrik melalui *dimmer*/pengatur daya.
- 4) Perakitan casing akhir
 - a) Semua komponen dimasukkan ke dalam *cover* berbentuk *box*.

- b) Tabung silinder ditempatkan di ruang pertama, kontrol kelistrikan di ruang kedua, dan bak air di bagian atas luar.
- c. Uji Fungsi Awal
- Setelah perakitan selesai, dilakukan uji fungsi awal:
- 1) Uji aliran udara → memastikan *blower* dapat mengalirkan udara melalui tabung hingga bak air.
 - 2) Uji kebocoran → memastikan tidak ada udara bocor pada sambungan.
 - 3) Uji diffuser → memastikan aliran udara benar-benar terdispersi memecah aliran udara dalam bentuk gelembung kecil di media air.
 - 4) Perbaikan teknis dilakukan bila ditemukan hambatan pada distribusi aliran atau kebocoran sistem.

d. Dasar Teoretis Tahap *Development*

Menurut Branch (2009), tahap *development* pada model *ADDIE* berfokus pada realisasi rancangan yang telah dibuat menjadi produk nyata yang dapat diujicobakan. Dalam pengembangan teknologi lingkungan, uji fungsi awal diperlukan untuk memastikan desain bekerja sesuai prinsip teoritisnya sebelum dilakukan implementasi di lapangan (Molenda, 2015).

3.1.4 *Implementation*

Tahap *implementation* adalah proses penerapan produk yang telah dikembangkan untuk diuji coba dalam kondisi nyata atau simulasi terbatas. Pada penelitian ini, implementasi dilakukan di lingkungan rumah tangga dengan simulasi pencemaran udara menggunakan pembakaran kardus telur sebagai sumber partikulat *PM10*.



Gambar 3.8 produk alat yang telah di kembangkan

a. Skema Uji Coba

Uji coba dilakukan di dalam sebuah *box* besar yang berfungsi sebagai ruang simulasi pencemar. *Box* ini dilengkapi dengan dua buah corong *outlet* pada bagian atas:

- 1) *Outlet* pertama → digunakan untuk pemantauan dan pengukuran konsentrasi *PM10* tanpa melalui penyaringan (sebagai kontrol/udara terkontaminasi).

2) *Outlet* kedua → dihubungkan dengan alat penyaring udara yang dikembangkan, sehingga udara tercemar masuk melalui alat, diproses melalui *cyclone separator, baffle filter, dan wet scrubber*, lalu dikeluarkan pada ujung *outlet* untuk pemantauan dan pengukuran kualitas udara setelah penyaringan.

Dengan sistem ini, diperoleh dua data pembanding secara paralel, yaitu konsentrasi *PM10* pada udara terkontaminasi (kontrol) dan udara setelah melalui proses penyaringan.

b. Prosedur Implementasi

Kardus telur dibakar di dalam *box* simulasi hingga menghasilkan asap yang memenuhi ruang.

- 1) Konsentrasi *PM10* pada *outlet* pertama dipantau menggunakan alat pengukur partikulat (misalnya *real-time dust monitor*).
- 2) Udara tercemar dialirkan ke dalam alat penyaring udara melalui *blower*.
- 3) Setelah melewati tiga tahap penyaringan (*cyclone, baffle, wet scrubber*), udara keluar melalui *outlet* kedua.
- 4) Konsentrasi *PM10* pada *outlet* kedua diukur dengan instrumen yang sama.

- 5) Hasil pengukuran dibandingkan untuk menilai efektivitas penyaringan.

c. Tujuan Implementasi

- 1) Memastikan alat dapat berfungsi sesuai desain dalam lingkungan rumah tangga.
- 2) Mengukur efektivitas alat dalam menurunkan konsentrasi *PM10* dari udara yang terkontaminasi pembakaran kardus telur.
- 3) Memberikan gambaran kinerja awal alat sebelum dilakukan analisis lebih lanjut.

d. Dasar Teoretis Implementasi

Menurut Branch (2009), tahap *implementation* dalam model *ADDIE* bertujuan untuk menerapkan produk dalam konteks terbatas guna melihat kesesuaianya dengan kebutuhan nyata. Pada penelitian pengendalian pencemaran udara, uji coba dalam ruang simulasi umum dilakukan untuk mengukur efektivitas reduksi polutan sebelum diaplikasikan secara luas (Hinds, 1999; Seinfeld & Pandis, 2016).

3.1.5 *Evaluation*

Tahap *evaluation* bertujuan untuk menilai sejauh mana alat penyaring udara yang dikembangkan mampu menurunkan konsentrasi partikulat *PM10*. Evaluasi dilakukan dengan

membandingkan hasil pengukuran konsentrasi *PM10* antara udara terkontaminasi tanpa penyaringan (kontrol) dan udara setelah melewati alat penyaring (perlakuan)

a. Instrumen Evaluasi

Instrumen yang digunakan adalah dua unit *Air Quality Monitor* (AQM) yang mampu mendeteksi konsentrasi partikulat *PM10* secara *real-time*.

- 1) AQM pertama ditempatkan pada *outlet* simulasi yang tidak terhubung dengan alat penyaring (kontrol).
- 2) AQM kedua ditempatkan pada *outlet* setelah udara melewati alat penyaring (perlakuan)

Penempatan dua instrumen ini memungkinkan pengukuran dilakukan secara simultan sehingga hasilnya lebih akurat dan tidak dipengaruhi oleh variasi waktu pembakaran.

b. Prosedur Evaluasi

- 1) Udara tercemar dihasilkan dari pembakaran kardus telur di dalam *box* simulasi.
- 2) Konsentrasi *PM10* dipantau secara bersamaan oleh kedua AQM (kontrol dan perlakuan).
- 3) Data hasil pemantauan dicatat dalam interval waktu setiap 1 menit selama proses pengujian.

- 4) Hasil pengukuran dianalisis dengan membandingkan konsentrasi *PM10* sebelum dan sesudah penyaringan.

c. Analisis Data

Data hasil pengukuran ditampilkan dalam bentuk:

- 1) Tabel hasil pengukuran → menunjukkan nilai konsentrasi *PM10* pada kontrol dan perlakuan setiap interval waktu.
- 2) Grafik pengamatan → menampilkan tren penurunan konsentrasi *PM10* dari waktu ke waktu pada kedua sisi (kontrol vs perlakuan).
- 3) Dua garis: kontrol (tanpa penyaringan) dan perlakuan (dengan penyaringan).

Jika memungkinkan, dilakukan pula analisis statistik sederhana (misalnya uji anova atau uji non-parametrik Wilcoxon) untuk memastikan apakah perbedaan konsentrasi *PM10* signifikan secara statistik.

a. Dasar Teoritis Evaluasi

Menurut WHO (2021), pemantauan kualitas udara dalam ruang sebaiknya dilakukan dengan instrumen *real-time* monitor untuk memperoleh gambaran dinamis konsentrasi partikulat. Evaluasi efektivitas suatu teknologi penyaring udara umumnya menggunakan pendekatan perbandingan konsentrasi polutan sebelum dan sesudah perlakuan, yang

dapat divisualisasikan melalui grafik tren penurunan (Zhang et al., 2023).

3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

3.2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di lingkungan perumahan mayang mangurai, rt 13, blok A1 yang dijadikan sebagai tempat simulasi pencemaran udara. Pemilihan lokasi rumah tangga dilakukan karena penelitian ini bertujuan mengembangkan alat penyaring udara skala kecil yang sesuai untuk penggunaan di ruang dalam rumah. Kondisi lokasi penelitian dibuat menyerupai ruangan tertutup dengan boks besar sebagai tempat pembakaran kardus telur yang berfungsi sebagai sumber partikulat *PM10*.

Menurut WHO (2021), polusi udara dalam ruang (*indoor air pollution*) merupakan salah satu masalah kesehatan lingkungan yang signifikan, terutama di negara berkembang di mana aktivitas rumah tangga sering menghasilkan partikulat berbahaya. Oleh karena itu, uji coba alat dalam skala rumah tangga dinilai relevan untuk menilai efektivitasnya secara langsung dalam konteks pemaparan masyarakat sehari-hari.

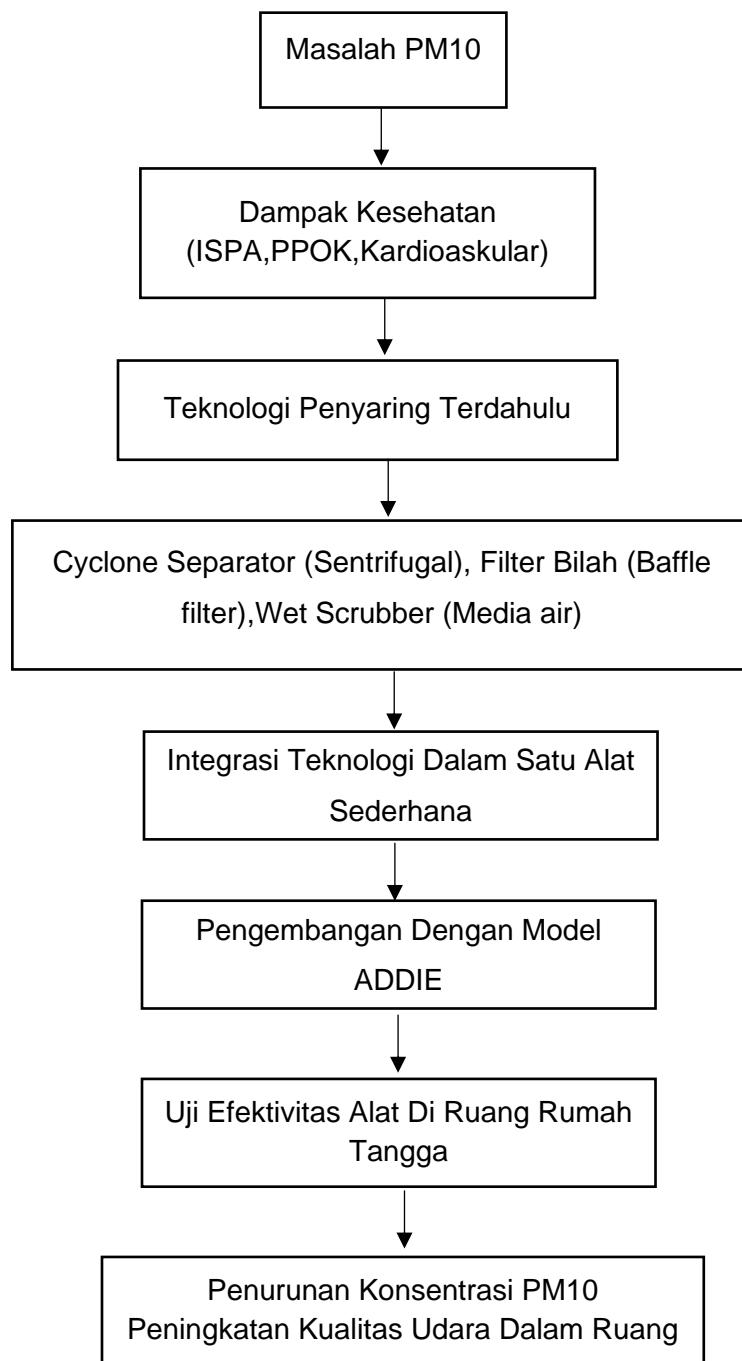
3.2.2 Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama 3 bulan, mulai dari bulan Maret–Mei 2025. Waktu penelitian mencakup tahap:

- a. Persiapan (pembuatan desain dan alat)

- b. Pengujian alat (pembakaran simulasi dan pengukuran PM10)
- c. Pengolahan data (analisis hasil pengukuran)

3.3 Kerangka Konsep / Kerangka Pikir



Bagan 3.1 Kerangka Konsep

Permasalahan utama adalah tingginya konsentrasi partikulat terutama *PM10* yang dihasilkan dari pembakaran bahan rumah tangga sederhana (seperti kardus telur) yang disimulasikan dalam penelitian ini. Pajanan *PM10* dalam ruangan dapat menimbulkan dampak kesehatan serius, di antaranya gangguan pernapasan, peningkatan risiko penyakit paru obstruktif kronik (PPOK), dan penyakit kardiovaskular (WHO, 2021; Zhang et al., 2023).

Untuk mengatasi hal tersebut, dikembangkan alat penyaring udara skala rumah tangga yang mengadopsi prinsip:

- a. *Cyclone Separator* (sentrifugal) → berfungsi mengendapkan partikel berukuran besar dan sedang melalui gaya sentrifugal (Wark & Warner, 2001).
- b. *Baffle Filter* (filter bilah) → menahan partikel berukuran sedang melalui tumbukan dengan permukaan bilah penyekat (Kim et al., 2023).
- c. *Wet Scrubber* (media air) → menjebak partikel halus termasuk *PM10* dengan cara kontak udara pada media air (EPA, 2020).

Alur logika penelitian ini adalah:

- a. Sumber pencemar: pembakaran kardus telur menghasilkan partikulat *PM10*.
- b. Masalah kesehatan: *PM10* berisiko mengganggu kesehatan pernapasan.

- c. Solusi: mengembangkan alat penyaring udara berbasis kombinasi tiga teknologi sederhana namun efektif.
- d. Pengujian: dilakukan dengan membandingkan konsentrasi $PM10$ pada udara terkontaminasi sebelum dan sesudah penyaringan.
- e. Hasil yang diharapkan: terjadi penurunan signifikan kadar $PM10$, sehingga alat terbukti efektif digunakan pada skala rumah tangga.

3.4 Variabel Dan Defenisi Operasional

3.4.1 Variabel Penelitian

Variabel penelitian adalah segala sesuatu yang menjadi objek pengamatan dalam penelitian dan dapat berubah nilainya (Sugiyono, 2017). Dalam penelitian ini, variabel yang digunakan adalah sebagai berikut:

a. Variabel bebas (*independen*)

- 1) Penggunaan alat penyaring udara berbasis kombinasi *cyclone separator, baffle filter, dan wet scrubber*.

- 2) Kategori:

- a) Udara tanpa penyaringan (kontrol).

- b) Udara dengan penyaringan (perlakuan).

b. Variabel terikat (*dependen*)

- 1) Konsentrasi partikulat $PM10$ dalam proses pengukuran ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

- 2) Diukur menggunakan *Air Quality Monitor* yang dapat mendeteksi kadar *PM10* secara *real-time*.
- c. Variabel kontrol (dikendalikan)
- 1) Jumlah dan jenis bahan pembakaran kardus telur dengan berat dan ukuran yang sama (satu lempeng setiap pembakaran/satu pengulangan).
 - 2) Lama waktu pengukuran (± 45 menit setiap ulangan).
 - 3) Jumlah ulangan pengukuran sebanyak (9 kali).
 - 4) Kondisi *box* (tertutup, tanpa ventilasi tambahan).

3.4.2 Definisi Operasional

Tabel 3.1 Defenisi Operasional

No	Variabel	Definisi Operasional	Alat Ukur	Cara Ukur	Satuan	Seka- la Ukur	Hasil Ukur
1	Variabel Bebas: Penggunaan alat penyaring udara berbasis <i>cyclone separator</i> , <i>baffle filter</i> , <i>scrubber</i>	Keberadaan/ penggunaan penyaring udara pada proses pengujian emisi hasil pembakaran kardus telur	Desain produk penyaring	Observasi langsung penggunaan alat (kontrol = tanpa perlakuan = dengan alat)	—	Nominal	1 = Ada (perlakuan) 0 = Tidak ada alat (kontrol)

2	Variabel Terikat: Konsentrasi partikulat <i>PM10</i>	Kadar partikulat <i>PM10</i> yang terukur dalam udara pembakaran kardus telur selama ± 45 menit	<i>Air Quality Monitor (AQM)</i>	Pembacaan langsung pada <i>AQM</i> setiap menit selama proses pembakaran	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Rasio	Nilai numerik consentrasi <i>PM10</i> (rentang 0 – ribuan $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 1. Memenuhi syarat standar <i>WHO</i> jika $\leq 45 \mu\text{g}/\text{m}^3$. 2. Tidak Memenuhi syarat jika $> 45 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
3	Variabel Kontrol	Faktor yang dijaga konstan selama pengujian: a. Jenis & berat kardus telur (satu lempeng per ulangan). b. Lama waktu pembakaran ± 45 menit. c. Kondisi boks tertutup tanpa ventilasi tambahan. d. Jumlah ulangan 9 kali (3 hari \times 3 ulangan).	Observasi prosedur standar	Pencatatan sesuai protokol	–	Nominal	Semua kondisi dikendalikan sama pada setiap ulangan

3.5 Hipotesis

Hipotesis dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

- a. Hipotesis Nol (H_0): Tidak terdapat perbedaan konsentrasi PM10 antara udara yang tidak melewati penyaringan (kontrol) dengan udara yang melewati alat penyaring berbasis *cyclone separator*, *baffle filter*, dan *wet scrubber* (perlakuan).
- b. Hipotesis Alternatif (H_1): Terdapat perbedaan konsentrasi PM10 antara udara yang tidak melewati penyaringan (kontrol) dengan udara yang melewati alat penyaring berbasis *cyclone separator*, *baffle filter*, dan *wet scrubber* (perlakuan).

3.6 Populasi dan Sampel

3.6.1 Populasi

Populasi dalam penelitian adalah seluruh udara dalam ruang *box* pembakaran yang berpotensi terpapar partikulat hasil pembakaran kardus telur pada ruang tertutup *box* simulasi. Populasi ini mewakili kondisi udara dalam ruang rumah tangga yang terkontaminasi partikulat PM10.

Menurut Notoatmodjo (2012), populasi penelitian adalah keseluruhan objek penelitian atau objek yang ditetapkan untuk dipelajari dan ditarik kesimpulannya.

3.6.2 Sampel

Sampel penelitian adalah bagian dari populasi yang secara nyata diamati dan diukur dalam penelitian. Sampel dalam penelitian ini adalah udara hasil pembakaran kardus telur yang dikumpulkan

dalam *box* simulasi, kemudian diukur konsentrasi partikulat *PM10* menggunakan *AQM air quality monitor*:

- a. Tanpa penyaringan (kontrol).
- b. Dengan penyaringan menggunakan alat yang dikembangkan (perlakuan).

Setiap pengukuran dilakukan dengan pengulangan sebanyak 9 kali ulangan dan di bagi 3 hari, setiap hari 3 kali pengulangan dengan lama pengamatan hingga pembakaran selesai (± 45 menit) untuk masing-masing ulangan. Pemilihan durasi dan jumlah ulangan ditetapkan oleh peneliti sebagai protokol operasional agar data lebih konsisten. WHO (2021) menekankan pentingnya pemantauan kualitas udara secara *real-time* dalam ruang tertutup, sehingga metode ini relevan untuk menilai efektivitas alat terhadap konsentrasi *PM10*.

3.7 Instrumen Penelitian

Instrumen penelitian adalah alat yang digunakan untuk mengumpulkan data sesuai dengan variabel yang ditetapkan (Sugiyono, 2017). Dalam penelitian ini instrumen yang digunakan adalah sebagai berikut:

- a. *Air Quality Monitor (AQM)* Digunakan untuk mengukur konsentrasi partikulat *PM10* secara *real-time*. Dua unit *AQM* digunakan, masing-masing ditempatkan pada:
 - 1) *Outlet* udara tanpa penyaringan (kontrol).

- 2) *Outlet* udara setelah melewati alat penyaring (perlakuan).
- b. WHO (2021) menekankan pentingnya pemantauan kualitas udara dalam ruang dengan menggunakan perangkat pemantau yang mampu mendeteksi partikel secara kontinu untuk mendapatkan gambaran konsentrasi polutan secara dinamis.
- c. Alat Penyaring Udara yang Dikembangkan
 - 1) Berbasis kombinasi *cyclone separator* (sentrifugal), *baffle filter* (filter bilah), dan *wet scrubber* (media air).
 - 2) Berfungsi sebagai perlakuan untuk menguji efektivitas dalam menurunkan konsentrasi *PM10*.
- d. Perangkat Pembakaran Kardus Telur (*Box Simulasi*)
 - 1) Digunakan untuk menghasilkan udara terkontaminasi partikulat *PM10*.
 - 2) Terdiri dari boks besar dengan dua corong *outlet*, satu dihubungkan ke alat penyaring dan satu digunakan untuk kontrol.
 - 3) Simulasi ini bertujuan merepresentasikan kondisi polusi udara dalam ruangan akibat pembakaran bahan rumah tangga.
- e. Alat Bantu Lain
 - 1) *Stopwatch* untuk mencatat interval waktu pengukuran.
 - 2) Alat tulis / laptop untuk mencatat hasil bacaan instrumen.

3.8 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ini menggunakan model pengembangan *ADDIE* (*Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation*). Model ini banyak digunakan dalam penelitian pengembangan (*Research and Development*) untuk menghasilkan produk yang teruji secara sistematis (Branch, 2009).

3.8.1 Analysis

Tahap analisis dilakukan untuk mengidentifikasi masalah utama, yaitu tingginya konsentrasi partikulat *PM10* yang dihasilkan dari pembakaran bahan rumah tangga sederhana (misalnya kardus telur). Pajanan *PM10* berhubungan erat dengan gangguan kesehatan pernapasan, peningkatan risiko penyakit paru obstruktif kronik (PPOK), asma, serta penyakit kardiovaskular (WHO, 2021; Zhang et al., 2023).

Berdasarkan tinjauan literatur, sebagian besar teknologi penyaring udara yang ada berbasis *cyclone separator*, *baffle filter*, atau *wet scrubber*, namun umumnya digunakan pada industri skala besar (Wark & Warner, 2001; EPA, 2020). Hal ini menjadi dasar bagi peneliti untuk mengadaptasi dan mengombinasikan teknologi tersebut ke dalam skala rumah tangga.

3.8.2 Design

Pada tahap ini dirancang prototipe alat penyaring udara berbentuk kotak (*cover box*) dengan dua ruang utama:

- a. Ruang silinder tempat *cyclone separator* dan *baffle filter*.
- b. Ruang media air (*wet scrubber*) serta kompartemen untuk sistem kelistrikan dan suplai daya.
- c. Alur udara: *blower* → *cyclone separator* → *baffle filter* → *wet scrubber* → udara bersih keluar.
- d. Desain mempertimbangkan prinsip efisiensi penyaringan berdasarkan literatur (Kim et al., 2023; Hinds, 1999).

3.8.3 *Development*

Tahap pengembangan dilakukan dengan pembuatan prototipe sesuai rancangan:

- a. Tabung silinder dari pipa PVC 4 inci.
- b. *Baffle filter* dibuat dari karton tebal 3 mm yang dipotong menyerong membentuk bilah vertikal.
- c. *Wet scrubber* berupa bak kaca dilengkapi difuser pada dasar bak.
- d. Blower menggunakan motor kipas *jet fan*, sedangkan aliran udara ke bak air menggunakan pompa portabel.
- e. Dimensi: tabung silinder tinggi 35 cm, bak air T21 × L19 × P24 cm.

3.8.4 *Implementation*

Prototipe diuji dalam *box* simulasi pembakaran kardus telur dengan dua *outlet*:

- a. *Outlet* kontrol → diukur konsentrasi *PM10* tanpa penyaringan.

b. *Outlet* perlakuan → dihubungkan dengan alat penyaring untuk mengukur efektivitas. Pengukuran dilakukan dengan dua unit *Air Quality Monitor* yang mencatat konsentrasi *PM10* setiap menit selama (± 45 menit per pengulangan), diulang sebanyak Sembilan (9 kali) dalam 3 hari



Gambar 3.9 box simulasi

3.8.5 Evaluation

Evaluasi dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran *PM10* sebelum dan sesudah penyaringan. Efektivitas dihitung berdasarkan penurunan rata-rata konsentrasi *PM10*. Data dianalisis menggunakan uji statistik sederhana untuk menilai signifikansi perbedaan konsentrasi. Hasil evaluasi digunakan untuk menilai apakah alat layak digunakan pada skala rumah tangga.

3.9 Teknik Pengolahan Data

Data penelitian diperoleh dari hasil pengukuran konsentrasi *PM10* menggunakan *Air Quality Monitor (AQM)* pada dua kondisi, yaitu:

- a. Udara tanpa penyaringan (kontrol).
- b. Udara dengan penyaringan (perlakuan).

Langkah pengolahan data adalah sebagai berikut:

- a. Pencatatan Data Mentah
- b. Data konsentrasi PM10 dicatat secara kontinu setiap 1 menit selama durasi pembakaran (± 45 menit) pada masing-masing 3 kali pengulangan setiap 1 hari, dengan total 9 kali pengulangan. Hasil pengukuran ditabulasi dalam bentuk tabel.

Penghitungan Nilai Rata-rata

- a. Dari setiap ulangan, dihitung nilai rata-rata konsentrasi PM10 untuk kondisi kontrol dan perlakuan. Selanjutnya dihitung rata-rata keseluruhan dari sembilan kali ulangan.

Analisis Deskriptif

- a. Data hasil pengukuran PM10 disajikan dalam bentuk tabel dan grafik. Ditampilkan nilai rata-rata, simpangan baku (standar deviasi), nilai minimum, dan maksimum untuk setiap kondisi (kontrol dan perlakuan). Penyajian grafik bertujuan memperlihatkan tren perubahan konsentrasi PM10 dari waktu ke waktu. Jumlah ulangan pengukuran total sebanyak 9 kali sehingga analisis deskriptif lebih kuat secara statistik.

Analisis Inferensial

- a. Untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan signifikan antara konsentrasi PM10 pada kondisi kontrol dan perlakuan, dilakukan uji ANOVA.
- b. Taraf signifikansi ditetapkan pada $\alpha = 0,05$.
- c. Jika nilai p-value $< 0,05$, maka terdapat perbedaan yang signifikan antara kontrol dan perlakuan.

Perangkat Analisis

- a. Pengolahan data dilakukan menggunakan perangkat lunak statistik SPSS.