

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

*Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) merupakan wahana atau pesawat tanpa awak. Dalam proyek akhir ini UAV sendiri berfungsi sebagai wahana yang membantu untuk membersihkan dinding luar gedung yang terbuat dari kaca. Tinjauan pustaka ini akan membahas secara bertahap dan sistematis mengenai konsep dan dasar-dasar dalam prinsip kerja *drone*, berbagai sistem, perhitungan dasar, serta penelitian terdahulu yang relevan.

#### **2.1 *Unmanned Aerial Vehicle Rotary-wing***

*Rotary-wing UAV* adalah tipe UAV yang bekerja dengan menggunakan beberapa rotor yang berputar secara vertikal untuk mendapatkan atau menghasilkan gaya angkat (*lift*). Jumlah konfigurasi rotor yang paling umum ditemui adalah *quadcopter* (4 rotor), selain itu juga ditemukan konfigurasi *hexacopter* (6 rotor), dan *octocopter* (8 rotor). Gambar 2.1 merupakan contoh *rotary wing* UAV dengan konfigurasi *quadcopter* (4 rotor).



Gambar 2.1 *Rotary-Wing* UAV

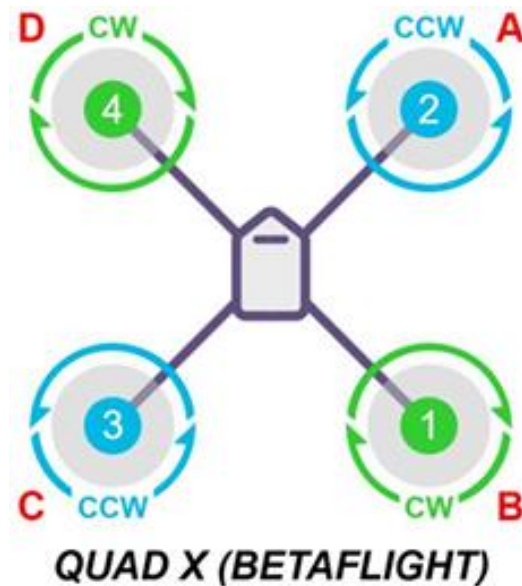
Sumber : <https://fotisedu.com/types-of-unmanned-aerial-vehicles-uavs-and-drones/>

Kelebihan dari UAV jenis *rotary wing* adalah kemampuannya dalam bermanuver dan melayang stabil pada satu titik tertentu (*hovering*), sehingga sangat cocok untuk aplikasi pembersihan dan perawatan gedung, selain itu UAV jenis ini merupakan jenis UAV VTOL (*Vertical Take-off and Landing*) sehingga dapat terbang dan mendarat secara vertikal tanpa memerlukan lahan untuk lepas dan landas. Sistem kendali pada *Rotary-wing* terbilang kompleks dikarenakan kestabilan dan manuver UAV tergantung pada sinkronisasi kecepatan antar rotor. Selain itu UAV jenis ini juga memiliki keterbatasan dalam konsumsi daya dikarenakan gaya angkat diperoleh dari tenaga motor dan *propeller* (Li, 2025).

*Drone* dengan tipe *Rotay-wing* atau *Vertical Take Off Landing* menggunakan motor yang memutar *propeller* yang akan menghasilkan daya angkat. *Propeller* yang berbentuk *airfoil* dan diameter serta *pitch angle* akan menghasilkan daya angkat. Besar daya angkat dipengaruhi dari besar diameter *propeller*, bentuk *airfoil* yang digunakan, dan *pitch angle* yang digunakan oleh *propeller* tersebut. *Drone* ini di kontrol dengan memanipulasi kecepatan angular yang berasal dari motor (Muhamad, Panjaitan and Yacoub, 2024).

Dalam landasan teori perancangan sistem propulsi wahana *quadcopter*, tata letak dan arah putaran motor memegang peranan krusial dalam menjaga stabilitas aerodinamis wahana, yang secara umum mengacu pada standar konfigurasi *Quad X* salah satunya pada ekosistem *firmware Betaflight* seperti pada gambar 2.2. Konfigurasi ini menetapkan posisi motor secara menyilang, di mana motor 1 berada di posisi kanan bawah, motor 2 di kanan atas, motor 3 di kiri bawah, dan motor 4 di kiri atas. Guna menetralisasi efek torsi rotasional yang dapat memicu wahana berputar tak terkendali pada sumbu vertikal (*yaw*), arah putaran baling-baling

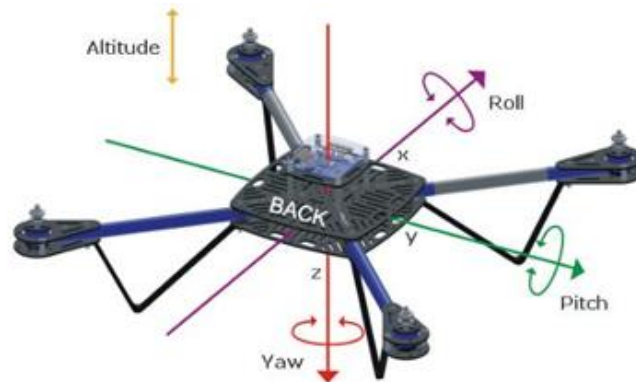
didesain saling berlawanan secara diagonal. Pasangan motor 1 dan 4 diatur untuk berputar searah jarum jam (*clockwise/CW*), sementara pasangan motor 2 dan 3 berputar berlawanan arah jarum jam (*counter-clockwise/CCW*).



Gambar 2.2 Arah Rotasi Motor *Quadcoper*

Sumber : <https://danmogot.com/blog/artikel-15887-mengenal-lebih-dekat-dengan-quadcopter.html>

Penerapan prinsip pembatalan torsi (*torque cancellation*) melalui konfigurasi menyilang ini merupakan syarat mekanis mutlak agar wahana memiliki daya angkat yang seimbang, mampu mempertahankan posisi mengudara statis (*hovering*) dengan stabil, serta menjaga presisi arah terbang (*heading*) terutama saat menahan gaya tolak (*recoil*) dari sistem penyemprotan. *Drone* mempunyai 3 dasar gerakan yaitu *roll*, *pitch* dan *yaw* yang mana dapat dilihat dari perubahan rotasi terhadap koordinat seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Gerakan *Quadcopter*

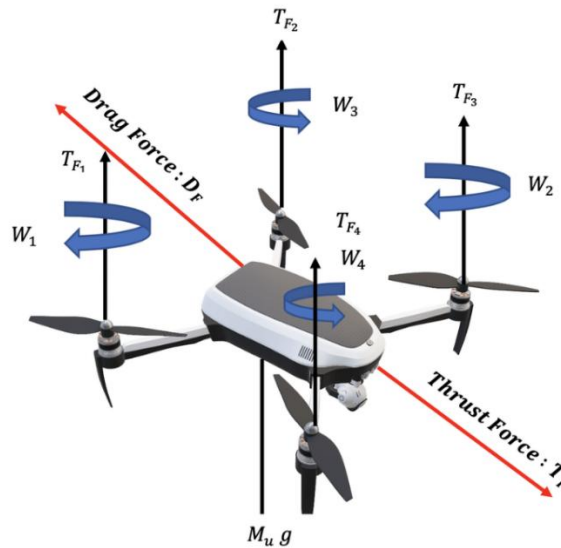
Sumber : <https://danmogot.com/blog/artikel-15887-mengenal-lebih-dekat-dengan-quadcopter.html>

Adanya tiga jenis gerakan pada UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), seperti gerakan *pitch*, *roll*, dan *yaw*, didasarkan pada manipulasi kecepatan rotasi masing-masing motor. Prinsip kerjanya adalah setiap motor pada *drone* menghasilkan gaya dorong (*thrust*) yang berbanding lurus dengan kecepatan putar *propeller*. Dengan mengatur perbedaan kecepatan antara motor-motor tersebut, sistem dapat mengendalikan besar dan arah gaya angkat (*lift*) yang dihasilkan oleh tiap *propeller*.

## 2.2 Stabilitas Kendali *Drone*

Salah satu komponen kritis dalam operasional UAV, khususnya UAV dengan tipe *quadcopter* yang secara inheren memiliki tingkat stabilitas yang tidak stabil sehingga diperlukan mekanisme pengendalian yang aktif terus menerus. *Quadcopter* memiliki enam derajat kebebasan (*6-Degree of Freedom*) yang mencakup sumbu translasi ( $x, y, z$ ) dan tiga sumbu rotasi (*roll*, *pitch*, *yaw*), yang mengharuskan sistem kendali dapat mengatur seluruh derajat kebebasan secara simultan dan *real-time* seperti pada Gambar 2.4. Dalam konteks UAV dengan sistem pembersihan (*cleaning UAV*), stabilitas kendali menghadapi tantangan tambahan berupa gaya reaksi semprotan bertekanan tinggi yang bekerja berlawanan

arah dengan posisi drone terhadap permukaan gedung.



Gambar 2.4 *Free Body Diagram Drone*

Sumber: [https://www.researchgate.net/figure/The-free-body-diagram-of-the-UAV-with-forces\\_fig1\\_345138979](https://www.researchgate.net/figure/The-free-body-diagram-of-the-UAV-with-forces_fig1_345138979)

Penelitian (Fadzulli, Marwah, Rahim, Salleh, *et al.*, 2025) menunjukkan bahwa pada tekanan operasional 50 dan 150 Bar dengan jarak semprot 1 meter, merupakan jarak yang menghasilkan gaya tekan paling optimal. Kondisi ini menyebabkan gangguan (*disturbance*) signifikan pada sumbu translasi horizontal yang apabila tidak dikompensasi secara tepat akan mengakibatkan ketidakstabilan posisi drone terhadap permukaan yang dibersihkan.

### 2.3 Kriteria Desain *Drone*

Kriteria desain merupakan parameter dan batasan yang digunakan sebagai acuan dalam perancangan sistem UAV dengan konfigurasi *quadcopter*. Kriteria ini bertujuan memastikan rancangan memenuhi kebutuhan operasional seperti kekuatan struktur, stabilitas penerbangan, dan kapasitas angkut sesuai dengan misi pembersihan fasad gedung.

### 2.3.1 Mampu Terbang Dengan Stabil

UAV dengan konfigurasi *quadcopter* harus mampu terbang dengan stabil selama proses operasi, terutama ketika berada pada posisi melayang (*hovering*) di depan permukaan fasad gedung. Stabilitas penerbangan sangat penting untuk memastikan arah dan jangkauan penyemprotan tetap terkontrol sehingga hasil pembersihan dapat merata pada permukaan dinding. Selain itu, kestabilan juga berpengaruh terhadap keamanan sistem, karena drone akan beroperasi pada jarak yang relatif dekat dengan permukaan bangunan.

### 2.3.2 UAV *Quadcopter* Dapat Mengintegrasikan Setiap Komponen

#### Elektronik

Desain UAV harus mampu mengintegrasikan seluruh komponen elektronik yang digunakan dalam sistem, seperti *flight controller*, *brushless motor*, *receiver*, kamera, modul *telemetry*, serta komponen distribusi daya. Integrasi ini penting agar setiap komponen dapat berfungsi secara terkoordinasi dalam mendukung sistem kendali dan navigasi *drone*. Selain itu, tata letak komponen elektronik juga harus dirancang dengan baik untuk memudahkan proses instalasi, perawatan, serta memastikan distribusi daya dan sinyal komunikasi berjalan secara optimal.

### 2.3.3 Terdapat *Bracket* Untuk Sistem Penyemprot

Rancangan UAV *Quadcopter* harus memilikiudukan atau *bracket* khusus untuk menempatkan sistem penyemprot. Dudukan ini berfungsi untuk menopang komponen *rod* penyemprot yang terhubung dengan *nozzle* dan selang agar terpasang secara kuat dan tidak mengganggu keseimbangan UAV. Desain bracket juga harus mempertimbangkan distribusi massa sehingga tidak menyebabkan perubahan titik pusat massa (*center of gravity*) yang dapat memengaruhi stabilitas

penerbangan.

#### **2.3.4 *Flight Time***

UAV *Quadcopter* dirancang memiliki waktu terbang minimal 10 menit sebagai prototipe. Waktu terbang ini dinilai cukup untuk melakukan pengujian sistem, demonstrasi konsep pembersihan fasad, serta evaluasi performa UAV dalam kondisi operasi nyata. Penentuan waktu terbang juga mempertimbangkan kapasitas baterai, efisiensi motor, serta total berat sistem UAV yang digunakan..

#### **2.3.5 *Drone Mampu Beroperasi Pada Gedung Dua Lantai***

*Drone* harus mampu beroperasi pada ketinggian yang setara dengan gedung dua lantai. Kriteria ini ditentukan untuk memastikan bahwa UAV dapat menjangkau area fasad bangunan dengan ketinggian menengah yang umum dijumpai pada bangunan perkantoran atau fasilitas publik. Selain itu, kemampuan ini juga berkaitan dengan kestabilan penerbangan, sistem navigasi, serta kemampuan sensor dalam menjaga jarak terhadap dinding bangunan.

#### **2.3.6 *Drone Mampu Terbang Dalam Radius 700 Meter***

*Drone* dirancang memiliki kemampuan terbang dalam radius hingga  $\pm 700$  meter dari posisi operator. Jangkauan ini memungkinkan operator mengendalikan UAV secara fleksibel tanpa harus berada sangat dekat dengan area kerja. Sistem komunikasi seperti *receiver* dan radio *telemetry* berperan penting dalam menjaga koneksi yang stabil antara UAV dan *ground control station* selama proses penerbangan berlangsung.

### **2.3.7 Drone Terdapat Proteksi Baling-Baling**

Untuk meningkatkan keamanan operasional, drone dilengkapi dengan sistem pelindung baling-baling (*propeller guard*). Komponen ini berfungsi untuk melindungi baling-baling dari benturan dengan objek di sekitar seperti dinding bangunan atau struktur lain. Selain itu, pelindung baling-baling juga membantu mengurangi risiko kerusakan komponen serta meningkatkan keselamatan ketika drone beroperasi di area yang sempit.

## **2.4 Arsitektur Sistem UAV**

Sistem UAV merupakan integrasi beberapa subsistem utama yang bekerja secara bersama-sama meliputi sistem propulsi, sistem kendali, sistem daya, dan sistem sensor. Setiap subsistem saling berkaitan sehingga kegagalan satu bagian dapat memengaruhi stabilitas penerbangan secara keseluruhan.

### **2.4.1 Sistem Propulsi**

Sistem propulsi pada *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) merupakan subsistem utama yang berfungsi menghasilkan gaya dorong (*thrust*) sehingga wahana mampu terangkat, melayang, serta bermanuver di udara. Sistem ini terdiri dari *motor brushless*, *Electronic Speed Controller* (ESC), dan *propeller* yang bekerja secara terintegrasi mengubah energi listrik dari baterai menjadi gaya angkat.



Gambar 2.5 Motor Brushless

Sumber : <https://www.brushless.com/480kv-brushless-motor-for-fixed-wing-drone>

Gambar 2.5 merupakan motor *brushless* yang berperan mengubah energi listrik menjadi energi mekanik berupa putaran poros yang menggerakkan baling-baling. Motor ini tidak menggunakan sikat sehingga gesekan mekanis lebih kecil, efisiensi tinggi (sekitar 85-92%), respons cepat, serta memiliki umur pakai lebih panjang. Secara konstruksi motor terdiri dari stator berupa kumparan tembaga dan rotor berupa magnet permanen. Arus tiga fasa yang dikendalikan ESC menghasilkan medan magnet berputar pada stator, kemudian berinteraksi dengan magnet rotor sehingga menghasilkan torsi.



Gambar 2.6 ESC

Sumber : <https://robu.in/product/readytosky-40a-2-4s-esc-for-drone/>

Gambar 2.6 di atas merupakan komponen *Electronic Speed Controller* (ESC) yang berfungsi mengatur kecepatan putar motor dengan menerima sinyal kendali

dari *flight controller* dan mengubah arus baterai menjadi sinyal tiga fasa untuk *motor brushless*. Pengaturan ini memungkinkan kontrol percepatan, arah putaran, serta respons perubahan beban secara *real-time* sehingga sangat memengaruhi kestabilan gerak UAV. Beberapa *ESC modern* juga dilengkapi proteksi arus berlebih dan panas untuk menjaga keandalan sistem.



Gambar 2.7 *Propeller*

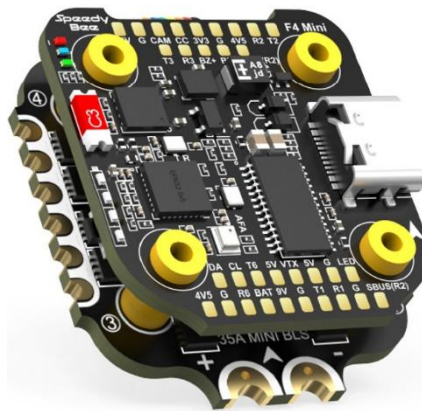
Sumber : <https://pusatdrone.com/cara-memilih-propeller-drone-yang-tepat-untuk-kebutuhan-anda/>

Gambar 2.7 di atas merupakan *Propeller* yang berfungsi mengubah energi putar dari motor menjadi gaya dorong atau gaya angkat. Kinerja *propeller* sangat menentukan efisiensi terbang dan stabilitas UAV. Parameter utama yang memengaruhi *thrust* meliputi diameter, *pitch*, dan bentuk *airfoil* baling-baling. *Propeller* dengan *pitch* rendah menghasilkan penerbangan lebih stabil dan hemat energi, sedangkan *pitch* tinggi menghasilkan gaya dorong lebih besar. Oleh karena itu pemilihan *propeller* harus disesuaikan dengan karakteristik motor serta kebutuhan misi.

Kesinambungan ketiga komponen tersebut menentukan performa keseluruhan UAV. Motor menghasilkan putaran, ESC mengontrol putaran, dan *propeller* mengubah putaran menjadi gaya angkat. Perancangan yang tepat akan menghasilkan rasio *thrust* terhadap berat yang optimal sehingga *drone* mampu terbang stabil dan efisien.

### 2.4.2 Sistem Kendali dan Navigasi

Sistem kendali dan navigasi merupakan subsistem kritis yang berperan dalam menentukan keberhasilan operasional UAV dalam mempertahankan kestabilan, arah gerak, dan mengatur posisi UAV selama penerbangan. Subsistem kendali pada wahana UAV dirancang untuk merespon perubahan dinamika penerbangan secara otomatis melalui algoritma kontrol yang mampu memproses data sensor dalam waktu nyata (*real-time*). Komponen utama dari sistem kendali adalah *flight controller* yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.8 *Flight Controller*

Sumber : <https://www.speedybee.com/speedybee-f405-mini-bls-35a-20x20-stack/>

*Flight Controller* (FC) merupakan pusat kendali berbasis mikrokontroler yang mengolah data sensor untuk menjaga kestabilan *drone*. Sensor IMU membaca sudut *roll*, *pitch*, dan *yaw* lalu diproses dengan algoritma PID untuk mengatur kecepatan tiap motor. FC juga menerima perintah pilot dan mengontrol arah, ketinggian, serta posisi UAV.



Gambar 2.9 GPS

Sumber : [https://docs.px4.io/v1.14/ko/dronecan/holybro\\_m8n\\_gps.html](https://docs.px4.io/v1.14/ko/dronecan/holybro_m8n_gps.html)

Gambar 2.9 merupakan salah satu komponen pada sub sistem navigasi. Subsistem navigasi pada wahana UAV bergantung pada teknologi GPS (*Global Positioning Sysytem*) sebagai input data absolut posisi wahana terhadap permukaan bumi. GPS berfungsi menentukan koordinat dan kecepatan *drone* sehingga memungkinkan *position hold*, navigasi *waypoint*, dan *return to home*. Integrasinya dengan FC membuat penerbangan lebih stabil dan presisi di area terbuka.



Gambar 2.10 Radio Telemetry

Sumber : <https://id.manuals.plus/holybro/17022-sik-telemetry-radio-manual>

Gambar 2.10 di atas merupakan komponen *radio telemetry* yang merupakan sistem komunikasi nirkabel antara UAV dan *ground control station*, digunakan

untuk memantau parameter penerbangan secara *real-time* serta mengirim perintah misi dari komputer ke *flight controller*. Melalui modul ini, operator dapat mengetahui posisi, ketinggian, kecepatan, arah, dan kondisi baterai selama penerbangan berlangsung.

Secara keseluruhan komponen pada sistem kendali dan navigasi yang terdiri dari *flight controller*, GPS, radio telemetry membentuk suatu arsitektur sistem yang saling terintegrasi dalam siklus penginderaan serta eksekusi perintah secara *real-time*. Integrasi sistem menuntut sinkronisasi data yang ketat antar subsistem serta kemampuan komputasi yang memadai agar latensi pemrosesan dapat diminimalkan, sehingga operasional UAV dapat bekerja secara aman dan efisien.

### 2.4.3 Sistem Daya

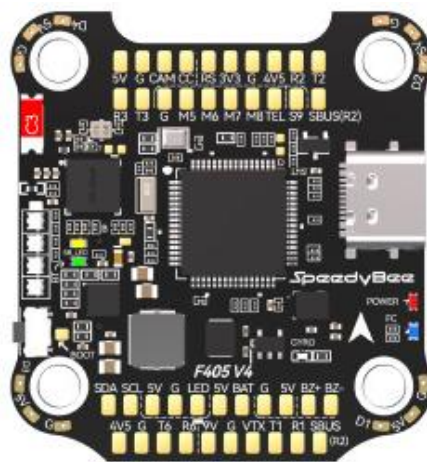
Sistem daya berfungsi sebagai penyedia dan pengatur distribusi energi listrik ke seluruh komponen UAV. Energi utama berasal dari baterai yang kemudian disalurkan melalui *power distribution board* (PDB) menuju *Electronic Speed Controller* (ESC), *flight controller*, serta perangkat elektronik lainnya. Gambar 2.12 merupakan PDB memastikan arus terbagi merata dan stabil sehingga setiap komponen menerima suplai sesuai kebutuhan tanpa terjadi penurunan tegangan berlebih.



Gambar 2. 11 Power Module

Sumber : <https://sky-drones.com/power/power-module.html>

Gambar 2.11 merupakan *power module* yang terhubung ke *flight controller* untuk memantau tegangan dan arus secara *real-time*. Data ini penting untuk mengetahui kondisi baterai selama penerbangan serta mencegah kegagalan sistem akibat *over-discharge* atau arus berlebih. Informasi konsumsi daya juga dapat ditampilkan pada *ground control station* sehingga operator dapat menentukan waktu pendaratan yang aman.



Gambar 2.12 *Power Distribution Board*

Sumber : <https://id.bossgoo.com/product-detail/drone-battery-6s-16000mah-22-2v-53371254.html>



Gambar 2.13 Baterai

Sumber : <https://www.tokopedia.com/dimatr>

Kapasitas baterai berpengaruh langsung terhadap durasi operasi UAV, namun penambahan kapasitas juga menambah massa sistem. Oleh karena itu perancangan sistem daya harus mempertimbangkan keseimbangan antara berat baterai, kebutuhan *thrust* motor, dan waktu terbang. Baterai merupakan komponen

penyimpan daya yang merujuk pada Gambar 2.13

#### 2.4.4 Sistem *Payload*

Sistem *Payload* merupakan muatan kerja yang dibawa UAV sesuai tujuan misi. Pada penelitian ini *payload* berupa sistem pembersih dinding luar gedung yang terdiri dari kamera, dan mekanisme penyemprot. Keberadaan *payload* memengaruhi massa total, kebutuhan *thrust*, serta stabilitas penerbangan sehingga harus dirancang ringan dan seimbang terhadap pusat gravitasi *drone*.



Gambar 2.14 Kamera

Sumber : <https://jakartacamera.com/product/kamera-actioncam-sportcam-1080p-full-hd-wifi-16mp-white-remote/a>

Kamera digunakan sebagai pengamat visual untuk membantu operator melihat kondisi permukaan dinding secara *real-time* yang ditunjukkan oleh Gambar 2.14. Kamera dipasang secara tetap pada rangka UAV sehingga arah pandang mengikuti pergerakan *drone* selama proses inspeksi dan pembersihan.



Gambar 2.15 Selang

Sumber : <https://store.goodplant.co.id/produk/selang-pe-hidroponik-5mm-roll/>



Gambar 2.16 Rod

Sumber : <https://www.tokopedia.com/bso/sprayer-extension-rod-universal-paint-spray-gun-tip->

Gambar 2.15 diatas merupakan selang air bertekanan yang membawa air dari pompa di darat menuju rod yang ditunjukkan oleh gambar 2.16 dan *nozzle* penyemprot. Sistem ini memungkinkan proses pembersihan tanpa membawa tangki air di udara sehingga massa UAV lebih ringan dan waktu terbang lebih lama. Integrasi *payload* dengan sistem kendali diperlukan agar jarak *drone* terhadap permukaan dinding luar tetap konstan selama proses pembersihan.

## 2.5 Sistem Penyemprot Berbasis *Ground Pump*

Dalam mengoptimalkan kinerja pembersihan di udara, desain penyemprotan menggunakan sistem *ground pump* dimana fluida air dialirkan dari pompa menuju *nozzle* penyemprot melalui selang fleksibel yang terhubung secara kontinu selama proses pembersihan berlangsung. Konfigurasi ini menawarkan keunggulan berupa pasokan air yang tidak terbatas selama operasi tanpa perlu pendaratan untuk pengisian ulang, namun di sisi lain menimbulkan tantangan tambahan pada sistem kendali drone akibat adanya beban dinamis selang (*tether load*) serta gaya reaksi semprotan yang bersifat variabel terhadap perubahan tekanan operasional.

## 2.6 Dinding Luar Gedung Material Kaca

Kaca merupakan material dinding luar yang banyak digunakan karena sifatnya yang transparan, estetis, dan mampu memaksimalkan pencahayaan alami. Namun, permukaan kaca mudah terlihat kotor akibat debu, noda air, dan polusi udara.

Secara mekanis, kaca memiliki kekuatan tekan yang tinggi namun getas terhadap beban tarik dan benturan. Oleh karena itu, metode pembersihan kaca harus dilakukan tanpa memberikan gaya mekanis berlebih yang dapat menyebabkan retak atau pecah. Pembersihan menggunakan semprotan air bertekanan rendah hingga menengah dinilai lebih aman dibanding metode gesek langsung. Penelitian menunjukkan bahwa metode *non-contact cleaning* seperti *water spraying* efektif untuk membersihkan permukaan kaca tanpa merusak material.

## 2.7 Perhitungan Perancangan *Hardware*

Perhitungan desain sistem elektrikal bertujuan untuk memastikan UAV mampu terbang dengan aman sesuai dengan kebutuhan misi. Parameter yang diperhitungkan meliputi *Thrust to Weight Ratio*, kebutuhan *thrust*, dan *flight time*.

### 2.7.1 Perhitungan *Thrust* UAV

Untuk menghitung *thrust* yang diperlukan oleh UAV, harus ditentukan terlebih dahulu berat total UAV. Nilai T/W yang aman untuk digunakan pada UAV *Vertical Takeoff Landing* adalah 1.7:1 dari berat total. Persamaan 2.1 dan Persamaan 2.2 berikut untuk menghitung *Thrust to Weight Ratio*.

$$\frac{T}{W} = 1.7 \quad 2.1$$

$$T_{total} = m \times \frac{T}{W} \quad 2.2$$

Dimana :

$$\frac{T}{W} = \text{Thrust to weight ratio}$$

$$M = \text{Berat Komponen (Kg)}$$

$$T = \text{Thrust (Kg)}$$

$$W = \text{Weight (N)}$$

$$T_{total} = \text{Thrust yang dibutuhkan (Kg)}$$

### 2.7.2 Perhitungan *Flight Time*

Untuk menghitung *flight time*, konsumsi listrik setiap komponen harus diketahui serta ditabulasi. Setelah itu dihitung penggunaan arus setiap komponennya untuk mendapat nilai perkiraan *flight time* UAV. Berikut adalah Persamaan untuk menghitung *flight time*.

1. Perhitungan *thrust motor brushless* pada saat *hovering* :

$$W = m \times g \quad 2.3$$

Dimana :

$$W = \text{Berat (N)}$$

$$m = \text{Massa Pesawat (Kg)}$$

$$g = \text{Gravitasi bumi (m/s}^2\text{)}$$

2. Thrust pada saat *hovering* per motor :

$$T_{motor} = \frac{W}{N} \quad 2.4$$

Dimana :

$N$  = banyak motor yang digunakan

3. Perhitungan arus total hovering :

$$I_{total} = N \times A_{motor} \quad 2.5$$

Dimana :

$I_{total}$  = Arus total yang digunakan motor (A)

$A_{motor}$  = Arus motor untuk thrust pada thrust to weight tersebut (A)

Perhitungan daya total hovering :

$$P = V \times I \quad 2.6$$

Dimana :

$P$  = Daya yang digunakan (W)

$I$  = Arus Listrik (A)

4. Perhitungan energi total baterai :

$$E_{total} = V \times C \quad 2.7$$

Dimana :

$E_{total}$  = Energi total baterai (Wh)

$V$  = Tegangan listrik (V)

$C$  = Kapasitas baterai (Ah)

5. Perhitungan batas aman penggunaan baterai :

$$E_{usable} = E_{total} \times 80\% \quad 2.8$$

Dimana :

$E_{usable}$  = Penggunaan batas aman energi baterai (Wh)

6. Perhitungan *flight time* :

$$t = \frac{E_{usable}}{P} \quad 2.9$$

Dimana :

t = Waktu (jam)

### 2.7.3 Perhitungan Kebutuhan Pompa

Dalam mengoptimalkan kinerja pembersihan, kebutuhan pompa perlu dilakukan kalkulasi agar mencapai tekanan kinerja yang optimal. Perhitungan kebutuhan pompa dilakukan dengan menggunakan pendekatan hidraulika dasar yang mencakup perhitungan kebutuhan *head* total sistem yang meliputi *head* statis akibat perbedaan ketinggian pompa dan *nozzle*, *head* kerugian akibat gesekan, *head* kerugian akibat belokan dan sambungan, serta *head* tekanan kerja yang *nozzle* yang dibutuhkan untuk menghasilkan gaya semprot efektif.

Berikut adalah parameter yang dibutuhkan dalam melakukan perhitungan kebutuhan spesifikasi pompa:

Tabel 2.1 Parameter Spesifikasi Pompa

| Parameter       | Satuan            |
|-----------------|-------------------|
| Elevasi         | m                 |
| Panjang selang  | m                 |
| Diameter selang | m                 |
| Area selang     | m <sup>2</sup>    |
| Densitas air    | Kg/m <sup>3</sup> |
| <i>Velocity</i> | m/s               |
| Gravitasi       | m/s <sup>2</sup>  |

| Parameter              | Satuan            |
|------------------------|-------------------|
| <i>Pressure target</i> | Bar               |
| Kapasitas              | m <sup>3</sup> /s |

1. Perhitungan luas penampang dan debit air pada selang

$$A = \frac{1}{4} \pi \times D^2 \quad 2.10$$

Dimana :

A = Luas penampang (m<sup>2</sup>)

D = Diameter lingkaran (m)

$$Q = A \times v \quad 2.11$$

Dimana :

Q = Debit air

v = Kecepatan aliran

2. Perhitungan bilangan *reynolds*

$$Re = \frac{v_s \times D}{\nu} \quad 2.12$$

Dimana :

Re = Reynolds number

V<sub>s</sub> = Kecepatan aliran (m/s)

ν = Viskositas kinematik fluida (m<sup>2</sup>/s)

3. Perhitungan faktor gesek (Colerbrook-White)

Untuk menentukan faktor gesek Darcy pada kondisi aliran turbulen (Re > 4000), digunakan persamaan Colebrook-White (Colebrook, 1939) pada Persamaan (2.13) berikut:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left[ \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \times \sqrt{f}} \right] \quad 2.13$$

Dimana :

$f$  = Faktor gesekan Darcy-Weisbach

$\varepsilon$  = Kekasaran absolut dinding dalam selang (mm)

Persamaan ini bersifat implisit sehingga diselesaikan secara iterasi numerik dengan menggunakan persamaan (Haaland, 1983) sebagai nilai awal  $f_0$ . Untuk mencari  $f_0$  pada iterasi metode Colebrook-White, digunakan persamaan Haaland seperti pada persamaan 2.14 berikut:

$$\frac{1}{\sqrt{f_0}} = -1,8 \log_{10} \left[ \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} \right)^{1,11} + \left( \frac{6,9}{Re} \right) \right] \quad 2.14$$

#### 4. Perhitungan head statis

$$H_{statis} = h_{gedung} \quad 2.15$$

Dimana :

$H_{statis}$  = Ketinggian vertikal

#### 5. Perhitungan head gesekan/ *major losses*

$$H_v = \frac{v^2}{2g} \quad 2.16$$

Dimana =

$H_v$  = Head velocity (m)

$v$  = Kecepatan aliran fluida (m/s)

$g$  = Percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )

Perhitungan kerugian tekanan akibat gesekan aliran fluida dalam

selang menggunakan persamaan (Weisbach, 1845) sebagaimana dikembangkan oleh Weisbach (1845) dan (Darcy, 1857), yang secara matematis dinyatakan dalam (White, 2011). Persamaan Darcy-Weisbach dapat dilihat pada Persamaan (2.17).

$$H_f = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad 2.17$$

Dimana :

$H_f$  = *Head loss* gesekan (m)

$f$  = Faktor gesek

$L$  = Panjang total selang (m)

$D$  = Diameter selang (m)

$$\Delta P_{major} = 1000 \times g \times h_f \quad 2.18$$

#### 6. Perhitungan *minor losses*

$$H_{minor} = K \times \frac{v^2}{2g} = K \times H_v \quad 2.19$$

$$H_{minor,total} = \sum_{i=1}^n K_i \times H_v \quad 2.20$$

Dimana :

$H_{minor}$  = *Head loss* minor

$K$  = Koefisien loss minor

$H_v$  = *Velocity Head*

$\Sigma$  = Penjumlahan dari seluruh komponen *fitting*

$$\Delta P_{minor} = 1000 \times g \times h_{minor} \quad 2.21$$

#### 7. Perhitungan head *nozzle*

$$H_{nozzle} = \frac{P_{nozzle}}{\rho \times g} \quad 2.22$$

Dimana :

$H_{nozzle}$  = Head kerja nozzle

$P_{nozzle}$  = Tekanan kerja nozzle

$\rho$  = Densitas air (kg/m<sup>3</sup>)

$g$  = Percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)

#### 8. Perhitungan head total

$$H_{total} = H_{static} + H_f + H_{minor} + H_{nozzle} \quad 2.23$$

$$P_{total} = \frac{H_{total} \times \rho \times g}{10^5} \quad 2.24$$

Dimana :

$10^5$  = Konveri Pa ke Bar

#### 9. Perhitungan daya pompa

$$P_{hidrolik} = \rho \times g \times Q \times H_{total} \quad 2.25$$

Dimana :

$P_{hidrolik}$  = Daya pompa (W)

### 2.7.4 Perhitungan Massa Air

Dalam menentukan waktu terbang (*flight time*) total beban angkat (*payload*) harus dihitung secara keseluruhan termasuk massa air. Massa air dihitung menggunakan persamaan 2.25 berikut:

$$V = \frac{1}{4} \pi \times D^2 \times L \quad 2.26$$

Dimana :

V = Volume air dalam selang (m<sup>3</sup>)

D = Diameter dalam selang (m)

L = Panjang Selang (m<sup>2</sup>)

Hitung massa air dalam selang menggunakan persamaan 2.26 berikut:

$$m = \rho \times V \quad 2.27$$

Dimana :

M = Massa air (kg)

$\rho$  = Massa jenis air (kg/m<sup>3</sup>)

#### 2.7.5 Perhitungan Mekanika Fluida

Dalam perancangan sistem wahana udara untuk pembersihan fasad gedung, mekanisme utama perontokan kotoran bergantung pada energi kinetik dan tekanan statis dari fluida yang disebarkan. Saat fluida diekstraksi keluar melalui *nozzle* dan menumbuk permukaan padat (dinding fasad), terjadi perubahan momentum linier yang menghasilkan gaya dorong mekanis. Gaya ini dikenal sebagai gaya aksi pancaran (*acting force*).

Berdasarkan prinsip dasar mekanika fluida, besaran gaya aksi ini dapat dikalkulasikan melalui dua pendekatan teoritis utama. Pendekatan pertama diturunkan dari distribusi tekanan pada luasan area kontak semburan (Fadzulli, Marwah, Rahim, Mohd Salleh, *et al.*, 2025), yang dirumuskan melalui Persamaan 2.28 berikut:

$$F_{acting} = P \times A \quad (2.28)$$

Dimana:

$F_{acting}$  = Gaya aksi fluida yang menumbuk fasad (N)

$P$  = Tekanan statis pada area target (Pa atau  $\text{N/m}^2$ )

$A$  = Luas area tumbukan ( $\text{m}^2$ )

Pendekatan teoritis kedua menggunakan *Teorema Momentum-Impuls* yang diaplikasikan pada analisis volume atur (*control volume*) untuk fluida yang mengalir secara kontinu (Munson *et al.*, 2013). Pendekatan ini menyatakan bahwa gaya pancaran (jet thrust) berbanding lurus dengan laju aliran fluida pada nozzle. Persamaan turunan Hukum II Newton untuk laju aliran massa dituliskan pada Persamaan 2.29 berikut:

$$F_{acting} = \rho \times Q \times v \quad (2.29)$$

$$F_{acting} = \dot{m} \times v \quad (2.30)$$

Dimana:

$\rho$  = Densitas air ( $\text{kg/m}^3$ )

$Q$  = Volumetrik flow rate ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$\dot{m}$  = Laju aliran massa ( $\text{kg/s}$ )

$v$  = Kecepatan linier ujung nozzle ( $\text{m/s}$ )

Besaran kecepatan aliran keluaran fluida pada nozzle dihitung berdasarkan prinsip konservasi energi Persamaan Bernoulli. Sementara itu, gaya tumbuk hidrodinamis yang dihasilkan dari pancaran tersebut dikalkulasikan menggunakan prinsip momentum linier fluida (Munson *et al.*, 2013). Persamaan 2.31 berikut merupakan turunan dari persamaan *bernoulli* yang merupakan aplikasi dari Hukum Kekekalan Energi pada aliran fluida. Berikut adalah Persamaan 2.31:

$$v_0 = C_d \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2.31)$$

$C_d$  = Koefisien Discharge

### 2.7.6 Perhitungan Gaya Reaksi Penyemprotan

Fenomena pancaran bertekanan ini tidak hanya menghasilkan tekanan pada fasad, tetapi juga memicu interaksi mekanis sekunder pada *platform* UAV. Mengacu pada Hukum III Newton mengenai kesetimbangan aksi-reaksi, setiap gaya dorong (*acting force*) yang diemisikan akan membangkitkan gaya tolak balik (*reaction/kickback force*) yang ekuivalen namun berlawanan arah dengan *nozzle*. Gaya tersebut didefinisikan pada Persamaan 2.32 berikut:

$$\sum F_{aksi} + \sum F_{reaksi} = 0 \quad (2.32)$$

Dengan memindahruaskan persamaan 2.32 di atas, kita mendapatkan Persamaan 2.33 berikut:

$$F_{reaksi} = -F_{aksi} \quad (2.33)$$

Tanda negatif pada Persamaan 2.33 di atas mendeskripsikan arah vektor gaya yang berbalik seratus delapan puluh derajat menuju wahana. Pada implementasinya, gaya reaksi ini bertindak sebagai beban translasi yang menekan instalasi *rod* penyemprot dan ditransmisikan langsung menuju sasis wahana.

### 2.7.7 Perhitungan Gaya Tekan (*Acting Force*)

Rumus ini diturunkan dari Hukum II Newton tentang Gerak yang diaplikasikan pada fluida berkecepatan, yang dikenal sebagai *Teorema Momentum Linier Fluida*. Gaya dorong atau tumbuk ( $F$ ) adalah hasil kali antara laju perubahan massa fluida (*mass flow rate*) dengan kecepatannya ( $v_0$ ), berikut adalah Persamaan

2.34:

$$F_0 = \dot{m} \times v_0 \quad (2.34)$$

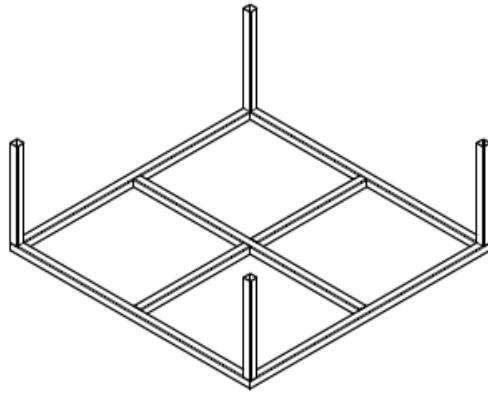
$$\dot{m} = \rho \times Q \quad (2.35)$$

$$F_0 = \rho \times Q \times v_0 \quad (2.36)$$

## 2.8 Konsep dan Fungsionalitas *Testbed* (Wahana Uji)

Dalam disiplin rekayasa sistem dan mekatronika, *testbed* (wahana uji) didefinisikan sebagai sebuah *platform* atau lingkungan eksekusi yang dikontrol secara ketat dan transparan, yang dirancang khusus untuk melakukan pengujian terhadap instrumen, modul perangkat lunak, maupun komponen mekanis. Penggunaan *testbed* memungkinkan peneliti untuk memvalidasi teori komputasi dan performa perangkat keras dalam kondisi yang mendekati dunia nyata (*real world conditions*), namun dengan risiko kegagalan sistem yang telah dimitigasi.

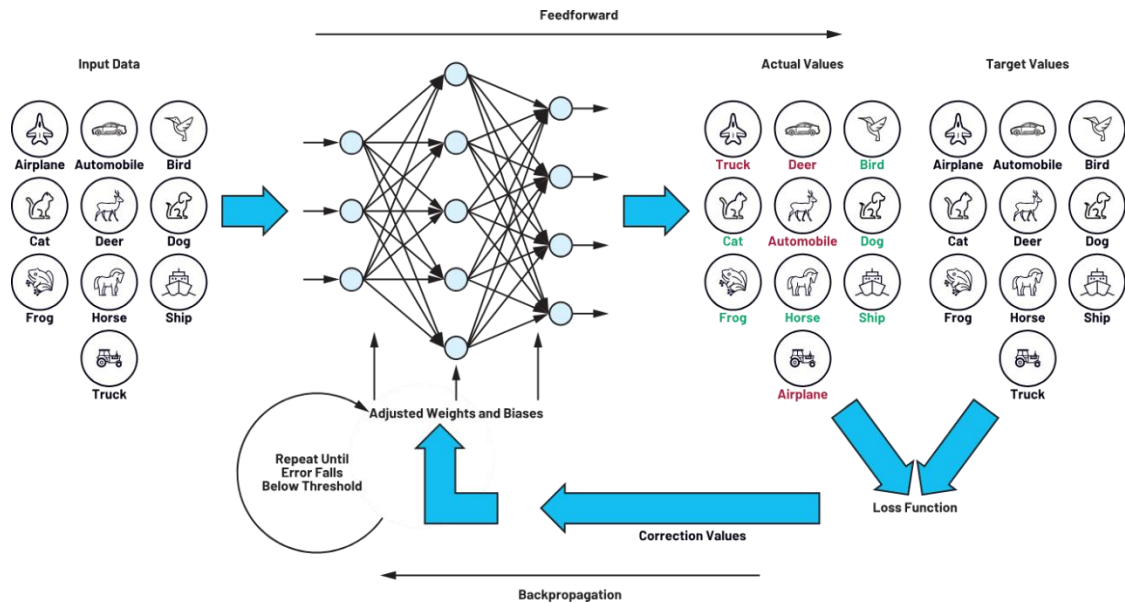
Dalam konteks pengembangan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) atau *drone*, *testbed* berfungsi sebagai jembatan esensial antara tahap simulasi komputasi dan tahap penerbangan bebas (*free flight*). Secara akademis, pengujian menggunakan *testbed* bertujuan untuk mengisolasi variabel-variabel dinamis sehingga kinerja masing-masing subsistem dapat dievaluasi secara independen sebelum diintegrasikan secara utuh. Gambar 2. 17 berikut adalah desain *testbed* yang digunakan pada penelitian ini:



Gambar 2. 17 Desain *Testbed*

## 2.9 *Model Training*

Pengolahan citra digital (*digital image processing*) berbasis *computer vision* memerlukan sebuah arsitektur model yang memiliki tingkat kesalahan prediksi (*false prediction rate*) yang rendah. Model *computer vision* pada penelitian ini tidak terintegrasi secara langsung pada UAV, melainkan terdapat pada komputer yang menjadi *ground control station*. Pada penelitian ini, model *computer vision* tidak hanya bertindak sebagai perangkat lunak analisis, melainkan berfungsi secara langsung sebagai sistem pengaman mekanis (*mechanical safeguard*) yang mengontrol aktuasi penyemprotan bertekanan tinggi. Oleh karena itu, tahapan pelatihan model (*model training*) dirancang secara terstruktur untuk mencapai tingkat presisi segmentasi noda fasad yang optimal.



Gambar 2. 18 Workflow Model Training

Sumber: <https://www.analog.com/en/resources/analogdialogue/articles/training-convolutional-neural-networks-what-is-machine-learning-part-2.html>

Berdasarkan Gambar 2. 18 tahap awal (*feedforward*), data input berupa citra digital dimasukkan ke dalam jaringan neuron berlapis untuk diproses secara matematis hingga menghasilkan sebuah nilai tebakan atau prediksi kelas (*actual values*). Hasil prediksi dari model ini kemudian disandingkan dengan label identitas asli dari citra tersebut (*target values*). Perbandingan ini dievaluasi menggunakan fungsi kerugian (*loss function*) untuk menghitung seberapa besar tingkat penyimpangan atau kesalahan (*error*) yang dilakukan oleh model.

Berdasarkan kalkulasi nilai kesalahan tersebut, algoritma kemudian menjalankan tahap *backpropagation* untuk mengirimkan sinyal koreksi dari *output* kembali ke arah *input* jaringan. Sinyal koreksi ini digunakan untuk mengkalibrasi dan memperbarui parameter bobot (*adjusted weights*) serta bias pada masing-masing neuron. Siklus *feedforward* dan *backpropagation* ini akan terus diulang secara terus-menerus (yang dalam praktiknya disebut sebagai siklus *epoch*) hingga

nilai *error* dari fungsi kerugian turun dan stabil di bawah ambang batas toleransi (*threshold*) yang ditargetkan, menandakan bahwa model telah konvergen dan mampu melakukan klasifikasi dengan akurat.

## **2.10 Training Environment Software**

Dalam konteks *machine learning* dan *deep learning*, lingkungan pelatihan (*training environment*) adalah ekosistem komputasi terintegrasi yang berfungsi sebagai ruang kerja teknis bagi algoritma kecerdasan buatan untuk memproses *dataset* dan memperbarui parameter bobotnya secara iteratif. Kualitas dan spesifikasi dari ekosistem ini yang mencakup perangkat keras, perangkat lunak, dan manajemen data sangat krusial karena berbanding lurus dengan efisiensi waktu komputasi serta stabilitas performa model yang dihasilkan.

Secara arsitektural, lingkungan pelatihan yang ideal ditopang oleh tiga komponen utama. Pertama adalah perangkat keras (*hardware*), yang umumnya sangat mengandalkan akselerasi *Graphics Processing Unit* (GPU) dengan ribuan inti pemrosesan untuk mengeksekusi kalkulasi matriks paralel secara eksponensial lebih cepat daripada CPU biasa. Kedua adalah kerangka kerja perangkat lunak (*software frameworks*) seperti TensorFlow atau PyTorch, yang bertindak sebagai antarmuka komputasi numerik tingkat tinggi beserta *driver* pendukungnya. Ketiga adalah Sistem Manajemen Data, yang memastikan kelancaran distribusi *dataset* (I/O) tanpa hambatan (*bottleneck*) sekaligus melakukan penyimpanan status pembelajaran (*checkpointing*) di setiap akhir siklus *epoch*.

Berdasarkan implementasi infrastrukturnya, *training environment* dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori utama. Kategori pertama adalah lingkungan

lokal (*on-premise*) yang beroperasi pada mesin fisik mandiri. Kategori kedua adalah lingkungan berbasis komputasi awan (*cloud-based environment*), yang menawarkan keunggulan berupa skalabilitas sumber daya server virtual yang dapat disesuaikan secara dinamis dengan besaran beban penelitian komputasi.

### 2.11 *Image Processing*

Pada penelitian ini *image processing* digunakan untuk mengevaluasi efisiensi pembersihan. Pengolahan citra digital (*digital image processing*) merupakan fondasi komputasi yang memanipulasi informasi visual untuk berbagai keperluan analitis. Citra digital didefinisikan sebagai fungsi dua dimensi,  $f(x, y)$ , di mana  $x$  dan  $y$  adalah koordinat spasial, dan nilai amplitudo  $f$  pada sembarang pasangan koordinat  $(x, y)$  disebut sebagai intensitas atau tingkat keabuan dari citra pada titik tersebut (Gonzalez and Woods, 2018).

Dalam evaluasi kinerja sistem penglihatan komputer (*computer vision*), hasil segmentasi tidak hanya berfungsi untuk melokalisasi objek secara visual, tetapi juga untuk mengekstraksi informasi kuantitatif dari suatu permukaan. Pada aplikasi pembersihan fasad gedung menggunakan *quadcopter*, efektivitas kinerja penyemprotan dievaluasi secara matematis melalui persentase efisiensi pembersihan (*Cleaning Efficiency*). Kuantifikasi ini dilakukan dengan membandingkan luasan area target sebelum dan sesudah proses pembersihan, seperti pada Persamaan 2.37 berikut:

$$Cleaning\ Efficiency\ (\%) = \left( \frac{A_i - A_o}{A_i} \right) \times 100\% \quad (2.37)$$

Dalam perspektif pengolahan citra digital, perhitungan area tersebut tidak dilakukan menggunakan metrik jarak fisik konvensional, melainkan

direpresentasikan oleh akumulasi piksel. Variabel  $A_i$  (*Area Initial*) merupakan total piksel yang terklasifikasi sebagai noda atau kotoran pada citra awal fasad sebelum pembersihan. Sementara itu, variabel  $A_o$  (*Area Observed*) merujuk pada total piksel area kotor yang masih terdeteksi oleh algoritma klasifikasi setelah proses penyemprotan selesai. Selisih dari kedua variabel tersebut merepresentasikan jumlah piksel kotoran yang berhasil dihilangkan. Melalui pendekatan berbasis piksel ini, sistem dapat menghitung rasio kebersihan secara presisi untuk mengevaluasi kemampuan manuver dan penyemprotan sistem tanpa memerlukan intervensi pengukuran manual.

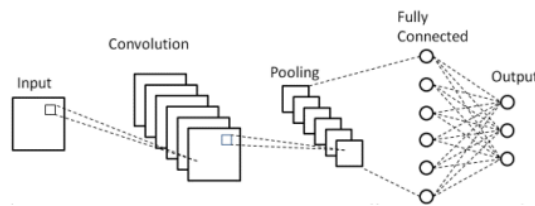
Melalui proses segmentasi piksel, luasan area yang berhasil dibersihkan dikuantifikasi dan diekspresikan sebagai nilai persentase relatif terhadap total luasan permukaan panel. Metode berbasis komputasi visual ini menawarkan pengukuran tingkat keberhasilan pembersihan yang andal dan terhindar dari bias subjektivitas pengamat. Melalui perhitungan ini, korelasi yang kuat antara tekanan mekanis (seperti gaya semprot cairan) dengan performa pembersihan dapat dianalisis secara akurat. Semakin tinggi persentase efisiensi pembersihan yang dihasilkan, semakin besar pula tingkat keberhasilan sistem dalam mengeliminasi kontaminan dari permukaan fasad bangunan.

#### **2.11.1 Pengolahan Citra Digital (*Digital Image Processing*)**

Data visual dari hasil pembersihan yang ditangkap melalui kamera (*action cam*) berbentuk gambar memiliki variasi data yang kompleks seperti variasi pencahayaan, tekstur material, dan gradasi warna kontaminan, metode pengolahan citra konvensional memiliki keterbatasan apabila dihadapkan pada variasi yang kompleks. Oleh karena itu, pendekatan berbasis *deep learning*, khususnya

*Convolutional Neural Network* (CNN) diimplementasikan pada penelitian ini.

Convolutional Neural Network (CNN) merupakan jenis jaringan saraf yang dirancang untuk memproses data berbentuk grid, seperti citra. CNN menggunakan operasi konvolusi untuk mengekstraksi fitur secara hierarkis dari pola sederhana hingga representasi tingkat tinggi, sehingga sangat efektif untuk tugas pengenalan pola visual (Goodfellow, Bengio and Courville, 2016). Proses ekstraksi fitur yang otomatis dan berhierarki ini membuat CNN sangat efektif dalam berbagai tugas pemrosesan visual. Pada Gambar 2. 19 berikut merupakan arsitektur CNN sederhana.



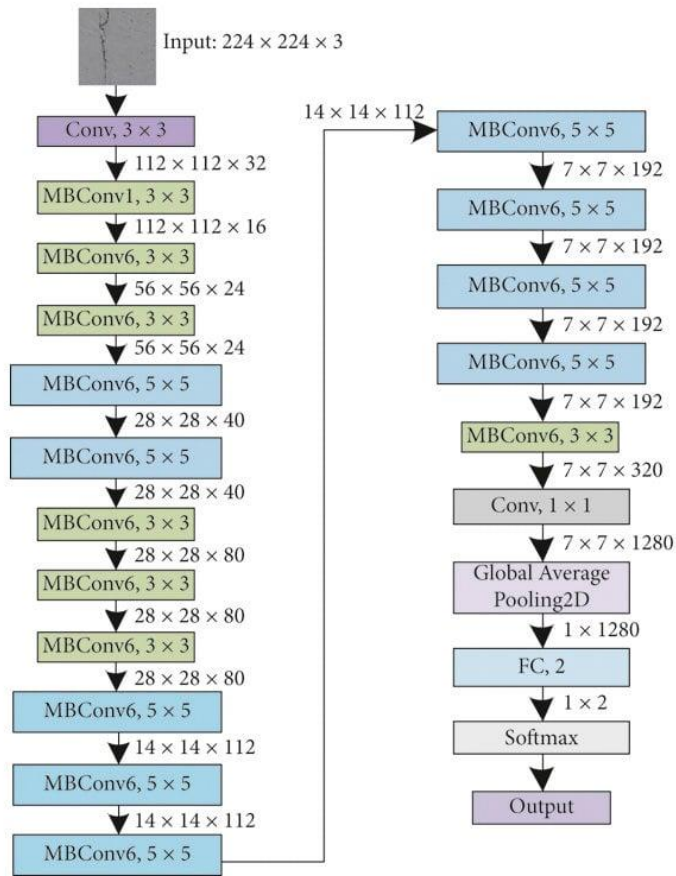
Gambar 2. 19 Arsitektur CNN

Sumber: [https://www.researchgate.net/figure/The-architecture-of-CNN\\_fig2\\_350964218](https://www.researchgate.net/figure/The-architecture-of-CNN_fig2_350964218)

Berdasarkan cara kerjanya, arsitektur CNN terdiri dari lapisan tiga lapisan utama, yakni lapisan *Convolutional*, lapisan *Pooling*, serta lapisan *Full Connection* yang berfungsi sebagai pengambil keputusan pada tahap akhir.

### 2.11.2 EfficientNet-B0

EfficientNet-B0 merupakan arsitektur *Convolutional Neural Network* (CNN) mutakhir yang diperkenalkan oleh Tan dan Le dari Google Research, dirancang secara khusus untuk mencapai keseimbangan optimal antara akurasi yang tinggi dan efisiensi komputasi.



Gambar 2. 20 Arsitektur EfficientNetB0

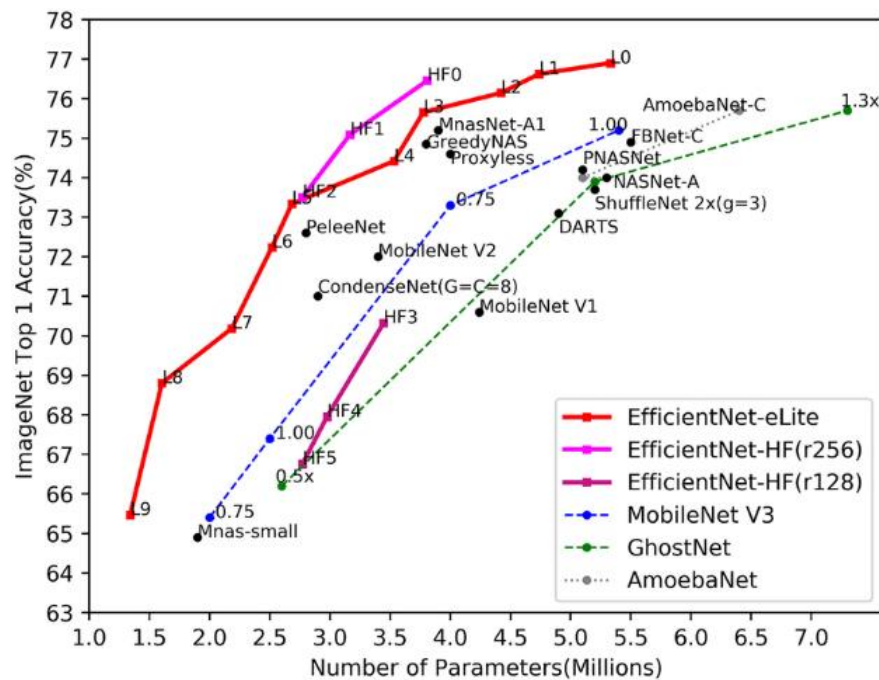
Pada Gambar 2. 20 diatas EfficientNetB0 merupakan arsitektur *baseline* jaringan saraf tiruan yang mengoptimalkan keseimbangan antara kedalaman (*depth*), lebar (*width*), dan resolusi (*resolution*) jaringan secara simultan melalui metode *compound scaling*. Karakteristik ini memungkinkan ekstraksi fitur spasial berjalan dengan akurasi tinggi namun tetap efisien dalam penggunaan sumber daya komputasi wahana. Proses ekstraksi dimulai dengan penerimaan input citra digital berdimensi  $224 \times 224 \times 3$  piksel yang kemudian direduksi secara spasial melalui lapisan konvolusi awal (*Conv 3x3*) menjadi matriks  $112 \times 112 \times 32$  piksel untuk menangkap fitur-fitur tingkat rendah (*low-level features*).

Inti dari ekstraksi fitur pada arsitektur ini bertumpu pada blok *Mobile Inverted Bottleneck Convolution* (MBConv1 dan MBConv6) yang mengintegrasikan *Depthwise Separable Convolution*. Struktur *inverted bottleneck* ini memperluas dimensi kanal secara internal untuk mengekstraksi karakteristik tekstur objek secara mendalam sebelum menyusunkannya kembali, sehingga secara efektif mampu menekan jumlah parameter matematis model. Seiring bertambahnya kedalaman jaringan, dimensi spasial citra menyusut secara bertahap hingga mencapai ukuran minimum  $7 \times 7$  piksel, diikuti dengan peningkatan ketebalan kanal fitur hingga mencapai 1280 kanal melalui lapisan *Conv 1x1*.

Sebelum memasuki tahap pengambilan keputusan, matriks fitur berdimensi tinggi tersebut dikompresi menjadi representasi vektor satu dimensi ( $1 \times 1280$ ) menggunakan lapisan *Global Average Pooling 2D* guna meminimalkan risiko *overfitting*. Pada tahap akhir, vektor fitur dialirkan menuju *Fully Connected Layer* yang telah dimodifikasi secara spesifik untuk kebutuhan klasifikasi biner (FC, 2). Lapisan klasifikasi ini diintegrasikan dengan fungsi aktivasi Softmax yang bertugas mengonversi keluaran numerik menjadi nilai probabilitas. Berdasarkan nilai probabilitas tertinggi yang dihasilkan oleh fungsi tersebut, sistem dapat menentukan keputusan akhir (*Output*) klasifikasi kondisi objek secara akurat.

Pemilihan arsitektur EfficientNetB0 sebagai instrumen klasifikasi *Deep Learning* pada penelitian ini didasarkan pada optimasi antara tingkat akurasi prediksi dan efisiensi beban komputasi. Berdasarkan studi literatur dan pengujian performa standar menggunakan dataset ImageNet (Tan and Le, 2019), keluarga arsitektur EfficientNet terbukti secara signifikan mengungguli model *Convolutional Neural Network* (CNN) konvensional lainnya dalam hal rasio

akurasi terhadap ukuran model.



Gambar 2. 21 Grafik Perbandingan Model

Sumber : (Tan and Le, 2019)

Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2. 21, EfficientNetB0 menempati posisi kurva grafik yang sangat ideal, yakni pada kuadran kiri. Posisi ini merepresentasikan pencapaian tingkat akurasi yang tinggi dengan jumlah parameter komputasi yang sangat minim (sekitar 5,3 juta parameter). Sebagai perbandingan mekanis, arsitektur lain seperti ResNet-50 membutuhkan parameter yang jauh lebih masif (di atas 20 juta parameter) untuk menghasilkan tingkat akurasi yang berada di bawah kurva EfficientNetB0.

### 2.11.3 Perhitungan Akurasi Model

Model terbaik yang sudah terlatih dilakukan tahapan evaluasi menggunakan data uji yang sama sekali tidak digunakan selama proses pelatihan maupun validasi. Evaluasi diawali dengan pembuatan *confusion matrix* yakni tabel yang merangkum

jumlah prediksi benar dan salah untuk setiap model. Pada *confusion matrix* diperoleh nilai dasar berupa True Positive (TP), False Positive (FP), False Negative (FN), dan True Negative (TN) yang dihitung untuk masing masing kelas dengan definisi sebagai berikut:

1. True Positive (TP): Sampel suatu kelas yang diprediksi benar sebagai kelas tersebut.
2. False Positive (FP): Sampel dari kelas lain yang salah diprediksi sebagai kelas tersebut.
3. False Negative (FN): Sampel suatu kelas yang gagal dikenali dan diprediksi sebagai kelas lain.
4. True Negative (TN): Sampel yang bukan dari kelas tersebut dan diprediksi benar sebagai bukan kelas tersebut.

Rumus metrik evaluasi yang digunakan dapat dituliskan sebagai berikut:

1. Akurasi : Menunjukkan proporsi prediksi yang benar terhadap seluruh sampel. Akurasi dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.38 berikut:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (2.38)$$

2. Presisi : Metrik yang digunakan untuk mengukur tingkat ketepatan model ketika memprediksi suatu kelas. Presisi dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.39 berikut:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2.39)$$

3. Recall : Metrik yang menggambarkan seberapa baik suatu model dalam

menemukan kembali sampel yang benar-benar termasuk dalam suatu kelas.

Recall dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.40 berikut:

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2.40)$$

4. F1-Score : Metrik evaluasi yang menggabungkan precision dan recall ke dalam satu nilai harmonis untuk menilai kinerja model secara lebih seimbang. F1-Score dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.41 berikut:

$$F1 - Score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (2.41)$$

#### 2.11.4 Perhitungan Efisiensi Pembersihan

Untuk mengevaluasi kinerja fungsional purwarupa *drone washer* dalam membersihkan permukaan fasad bangunan, parameter keberhasilan sistem dikuantifikasi menggunakan persentase Efisiensi Pembersihan (*Cleaning Efficiency*). Persentase ini dihitung dengan membandingkan selisih luasan area kontaminan sebelum dan sesudah proses penyemprotan hidro-mekanis, yang direpresentasikan pada Persamaan 2.42 berikut:

$$Cleaning Efficiency = \left( \frac{A_i - A_o}{A_i} \right) \times 100\% \quad (2.42)$$

Dimana:

$A_i$  (*area intial*) = Luas area sebelum penyemprotan

$A_o$  (*area output*) = Luas area setelah penyemprotan

Melalui substitusi nilai piksel ke dalam persamaan tersebut, sistem dapat memberikan umpan balik (*feedback*) berupa metrik persentase keberhasilan secara

objektif. Jika hasil perhitungan efisiensi mencapai nilai 100%, hal ini mengindikasikan bahwa seluruh piksel kotoran ( $A_i$ ) telah berhasil luruh tanpa menyisakan residu ( $A_o = 0$ ). Sebaliknya, jika persentase efisiensi masih berada di bawah nilai ambang batas (*threshold*) kebersihan yang ditetapkan, sistem komputasi dapat merekomendasikan wahana untuk melakukan manuver penyemprotan ulang pada area target tersebut.