

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 UAV *Quadcopter*, 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

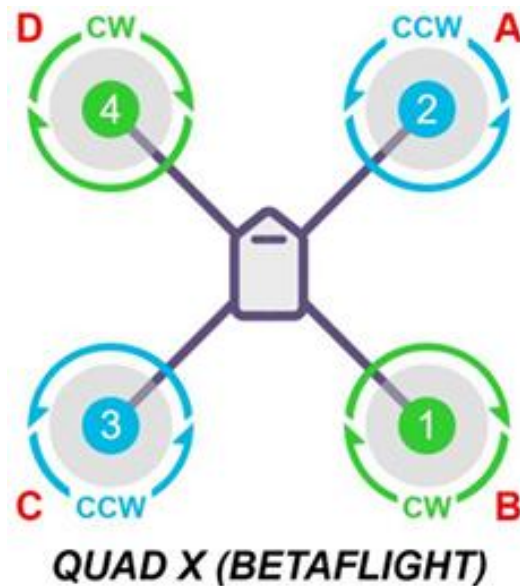
Sumber : <https://fotisedu.com/types-of-unmanned-aerial-vehicles-UAVs-and-UAV-Quadcopters/>

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).

UAV 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. UAV 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

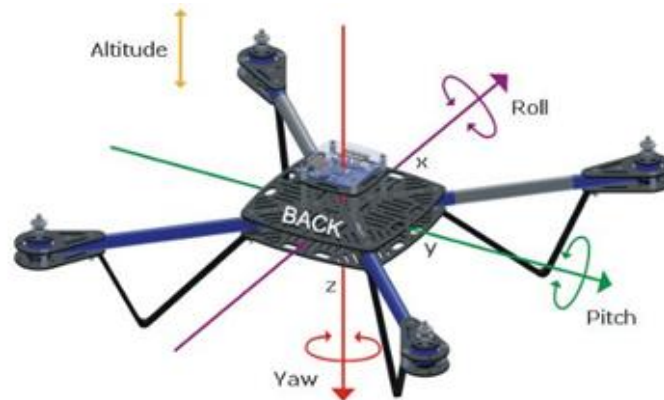
didesain saling berlawanan secara diagonal. Pasangan motor 1 dan 4 diatur untuk berputar searah jarum jam (*clockwise/CW*), sementara pasangan motor 2 dan 3 berputar berlawanan arah jarum jam (*counter-clockwise/CCW*).



Gambar 2.2 Arah Rotasi Motor *Quadcopter*

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. UAV *Quadcopter* 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*

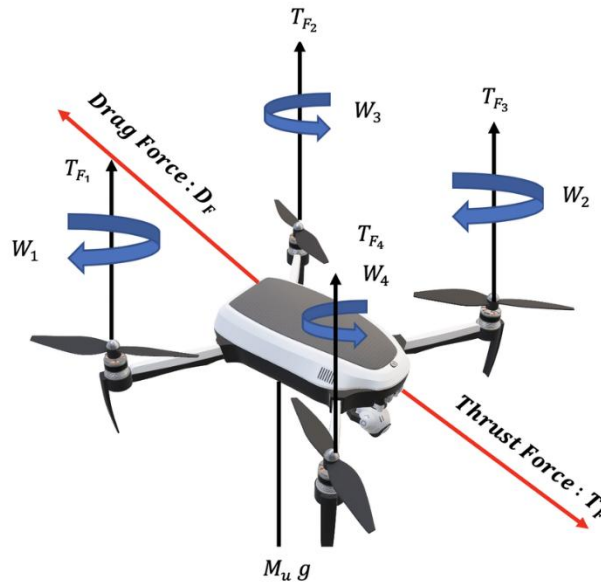
Sumber : <https://danmogot.com/blog/artikel-15887-mengenal-lebih-dekat-dengan-Quadcopter.html>

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 UAV *Quadcopter* 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 Freebody Diagram UAV *Quadcopter*

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 UAV *Quadcopter* terhadap permukaan gedung.



Gambar 2.4 Free Body Diagram UAV *Quadcopter*

Sumber: https://www.researchgate.net/figure/The-free-body-diagram-of-the-UAV-with-forces_fig1_345138979

Penelitian (Fadzulli *et al.*, 2025) menunjukkan bahwa pada tekanan operasional 50 dan 150 Bar dengan jarak semprot optimal 1 meter, gaya reaksi yang diterima oleh UAV *Quadcopter*. Kondisi ini menyebabkan gangguan (*disturbance*) signifikan pada sumbu translasi horizontal yang apabila tidak dikompensasi secara tepat akan mengakibatkan ketidakstabilan posisi UAV *Quadcopter* terhadap permukaan yang dibersihkan.

2.3 Kriteria Desain UAV *Quadcopter*

Kriteria desain merupakan parameter dan batasan yang digunakan sebagai acuan dalam perancangan sistem UAV *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 *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 UAV *Quadcopter* 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 UAV *Quadcopter*. 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 Mempunyai *Bracket* Untuk Sistem Penyemprot

Rancangan UAV *Quadcopter* harus memilikiudukan atau *bracket* khusus

untuk menempatkan sistem penyemprot. Dudukan ini berfungsi untuk menopang komponen seperti selang, *nozzle*, dan komponen pendukung lainnya 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 sekitar 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 UAV *Quadcopter* Mampu Beroperasi Pada Gedung Dua Lantai

UAV *Quadcopter* harus mampu beroperasi pada ketinggian yang setara dengan gedung dua lantai yang kurang lebih pada ketinggian 8 meter. 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 UAV *Quadcopter* Mampu Terbang Dalam Radius 700 Meter

UAV *Quadcopter* dirancang memiliki kemampuan terbang dalam radius

hingga ± 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 UAV *Quadcopter* Terdapat Proteksi Baling-Baling

Untuk meningkatkan keamanan operasional, UAV *Quadcopter* 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 UAV *Quadcopter* 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 2.4 Motor Brushless

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

Gambar 2.5 diatas merupakan motor *brushless* 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 2.5 ESC

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

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 2.6 *Propeller*

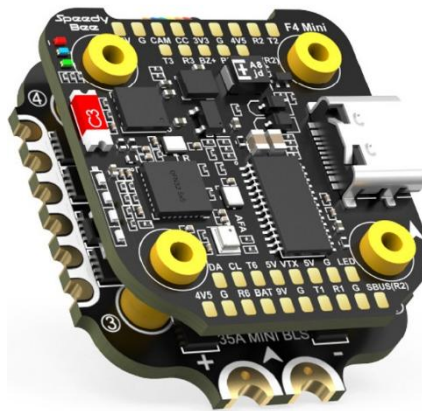
Sumber : <https://pusatUAVQuadcopter.com/cara-memilih-propeller-UAVQuadcopter-yang-tepat-untuk-kebutuhan-anda/>

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 UAV *Quadcopter* 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.



Gambar 2.7 *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 UAV *Quadcopter*. 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 2.8 GPS

Sumber : https://docs.px4.io/v1.14/ko/UAV_Quadcoptercan/holybro_m8n_gps.html

Gambar 2.9 di atas 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 UAV *Quadcopter* sehingga memungkinkan *position hold*, navigasi *waypoint*, dan *return to home*. Integrasinya dengan FC membuat penerbangan lebih stabil dan presisi di area terbuka.



Gambar 2.9 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, dan telemetri 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

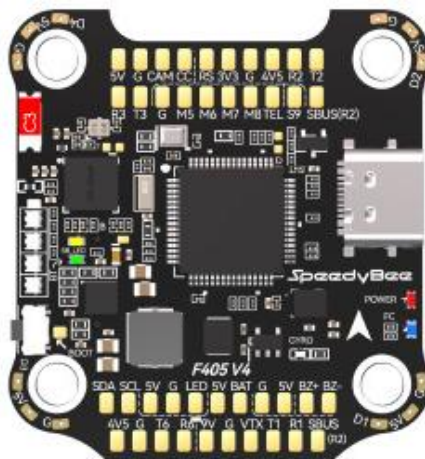
Sistem daya berfungsi sebagai penyedia dan pengatur distribusi energi listrik ke seluruh komponen UAV. Energi utama berasal dari baterai yang kemudian disalurkan melalui *power distribution board* (PDB) menuju *Electronic Speed Controller* (ESC), *flight controller*, serta perangkat elektronik lainnya. 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-UAV-Quadcopters.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/UAV-Quadcopter-battery-6s-16000mah-22-2v-53371254.html>



Gambar 2.13 Baterai

Sumber : https://www.tokopedia.com/dimatr/ready-stock-li-ion-6s-8000mah-140a-UAVero-pro-21700-6s2p-6s-8000-mah-battery-high-discharge-140a-max-murah-1733466421641184585?extParam=ivf%3Dfalse%26keyword%3D6s2p+21700%26search_id%3D20260325180036AD13A2A07CA4B7081YII%26src%3Dsearch

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 UAV *Quadcopter*.



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 UAV *Quadcopter* selama proses inspeksi dan pembersihan.



Gambar 2.15 Selang

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



Gambar 2.10 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 UAV *Quadcopter* terhadap permukaan dinding luar tetap konstan selama proses pembersihan.

2.4.5 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 UAV *Quadcopter* akibat adanya beban dinamis selang (*tether load*) serta gaya reaksi semprotan yang bersifat variabel terhadap perubahan tekanan operasional.

2.5 Dinding Luar Gedung Material Kaca

Kaca merupakan material dinding luar yang banyak digunakan karena sifatnya yang transparan, estetik, 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.

2.6 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*.

2.6.1 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. Maka berikut adalah Rumus 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 :

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

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

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

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

2.6.2 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 rumus untuk menghitung *flight time*.

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

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

Dimana :

W = Berat (N)

m = Massa Pesawat (Kg)

g = Gravitasi bumi (m/s^2)

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 PID

PID adalah singkatan dari *proportional*, *integrative*, dan *derrivative*. PID berfungsi mempertahankan orientasi dan posisi UAV *Quadcopter* sesuai dengan perintah pilot atau *autopilot*. Selain itu PID juga berfungsi untuk mempertahankan posisi UAV *Quadcopter* dari gangguan seperti angin, perubahan beban, maupun manuver mendadak. Berikut adalah persamaan umum PID.

$$u(t) = k_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad 2.10$$

Keterangan :

- $u(t)$ = Output Kontrol
- $e(t)$ = Error
- K_p = Konstanta Proportional
- K_i = Konstanta Integrative
- K_d = Konstanta Derivative

Error diperoleh dari selisih antara :

$$e(t) = \text{Setpoint} - \text{Actual Value} \quad 2.11$$

Pada *Quadcopter*, actual value diperoleh dari sensor seperti :

- Gyroscope
- Accelerometer
- Barometer
- Magnetometer

2.7.1 Proportional

Komponen proportional menghasilkan output respon yang sebanding dengan besar error.

$$P_{out} = K_p \times e(t) \quad 2.12$$

Hal ini mengartikan bahwa semakin besar error maka akan semakin besar koreksi yang diberikan. Pada UAV *Quadcopter* dengan konfigurasi *Quadcopter*, komponen P merupakan komponen utama yang membuat UAV *Quadcopter* bereaksi cepat terhadap perubahan sudut atau gangguan.

Dalam konteks UAV *Quadcopter* dengan konfigurasi *Quadcopter*,

komponen P memiliki kelebihan dan kekurangan.

Kelebihan Komponen P :

- Respon yang cepat dalam koreksi error pada UAV *Quadcopter Quadcopter*.
- Respon yang cepat ketika dikendalikan oleh pilot.

Kekurangan Komponen P :

- Tidak dapat menghilangkan steady-state error. Hal ini dikarenakan, komponen P membutuhkan error untuk menghasilkan output jika error terlalu kecil maka output koreksi juga kecil sehingga error tidak benar-benar hilang.
- Jika nilai komponen P terlalu tinggi, maka UAV *Quadcopter* akan menjadi terlalu agresif dan akan melewati *setpoint* sehingga akan terjadi koreksi berlebihan. Fenomena ini akan menyebabkan *overshoot* pada UAV *Quadcopter* yang melewati *setpoint*, dan *oscillation* pada koreksi UAV *Quadcopter* yang berlebihan.
- Jika nilai komponen P terlalu tinggi, maka UAV *Quadcopter* akan menjadi terlalu lambat dalam mencapai *setpoint*, selain itu pada kontrol UAV *Quadcopter* juga akan menjadi lambat dalam koreksi gangguan pada UAV *Quadcopter*.

2.7.2 Integral

Komponen integral bekerja dengan mengakumulasi error terhadap waktu dan menghasilkan sinyal koreksi tambahan untuk menghilangkan steady-state error.

$$I_{out} = K_i \int e(t)dt \quad 2.13$$

Berbeda dengan *proportional* yang hanya merespon *error* saat ini, integral mempertimbangkan lamanya *error* terjadi sehingga sistem dapat mencapai kondisi yang lebih presisi dan stabil.

Dalam hal konteks UAV *Quadcopter Quadcopter* komponen I dapat berfungsi sebagai :

- Menghilangkan *error* atau gangguan konstan seperti, terpaan angin, distribusi berat tidak merata, perbedaan performa motor.
- Menghilangkan *error* yang disebabkan oleh komponen P yang akan berefek kepada kestabilan *hovering*, *altitude hold*, *position hold*.

Namun komponen I juga memiliki kekurangan sebagai berikut :

- Respon koreksi yang lambat, hal ini dikarenakan komponen I yang mengumpulkan *error* terhadap waktu sehingga koreksi dari komponen I akan lambat.
- Menyebabkan *overshoot*, jika nilai komponen I terlalu besar maka koreksi dapat terus berlangsung walaupun *error* sudah hilang. Hal ini mengakibatkan UAV *Quadcopter* dapat *overshoot* dan osilasi.
- Terjadinya integral *windup* yaitu *error* yang besar terjadi dalam waktu yang lama sehingga koreksi integral menumpuk dan output akan menjadi sangat besar, ketika kondisi kembali normal sistem masih menyimpan akumulasi *error* sehingga terjadi koreksi berlebih. Pada UAV *Quadcopter Quadcopter* hal ini akan mengakibatkan delay stabilisasi, wobble, hingga menyebabkan bouncing.

2.7.3 Derivative

Komponen *derivative* bekerja dengan menghitung laju perubahan *error*

terhadap waktu.

$$D_{out} = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad 2.14$$

Derivative digunakan untuk meredam osilasi, mengurangi overshoot, dan meningkatkan kestabilan respon sistem. Pada *Quadcopter*, derivative membantu menghasilkan gerakan yang lebih halus dan presisi dengan memperlambat perubahan sudut sebelum melewati setpoint. Dikarenakan komponen *derivative* hanya melihat laju perubahan errornya maka, komponen *derivative* sangat sensitif terhadap noise atau vibrasi pada sensor sehingga memerlukan *frequency filtering* pada *flight controller* untuk menjaga kestabilan sistem kontrol. Selain itu penggunaan *dampener* pada *flight controller* juga dapat mencegah adanya noise yang besar masuk kedalam sensor.