

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. Penulis memfokuskan pada rancang bangun *frame drone* sebagai struktur utama yang menopang seluruh komponen-komponen pada UAV. Tinjauan pustaka ini akan membahas secara bertahap dan sistematis mengenai konsep dan dasar-dasar dalam *drone*, desain *frame*, simulasi FEA, serta Uji penerbangan.

1.7 Unmanned Aerial Vehicle Rotary-wing UAV

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), tetapi tidak jarang juga konfigurasi *hexacopter* (6 rotor), dan *octocopter* (8 rotor). Gambar 2.1 merupakan contoh *rotary wing* UAV dengan konfigurasi *quadcopter* (4 rotor).



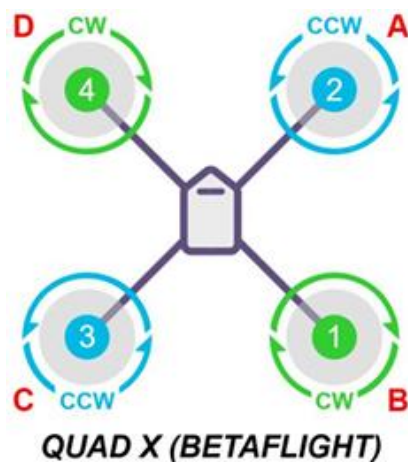
Gambar 2.1 Rotary-Wing UAV

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 karena gaya angkat diperoleh dari tenaga motor dan *propeller* (Li, 2025).

Drone dengan tipe *Rotary-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*. *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 *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. *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*.

1.8 *Frame Rotary-wing* UAV

Frame multiroto atau *rotary-wing* merupakan jenis yang paling umum digunakan pada UAV jenis multirotor memiliki kemampuan hovering yang baik sehingga cocok digunakan untuk aplikasi pemetaan, inspeksi, dan operasi pada area sempit yang membutuhkan kestabilan posisi secara presisi (Abdulkareem *et al.*, 2022).

Desain multirotor terdiri dari beberapa lengan (*arm*) yang masing-masing memegang satu *motor brushless*. Konfigurasi yang paling umum adalah *quadcopter* dengan bentuk X, +, atau H. Konfigurasi X banyak digunakan karena memberikan keseimbangan antara stabilitas dan kemampuan manuver, serta menyediakan area yang cukup untuk pemasangan *payload* di bagian depan atau bawah *frame* seperti ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Frame Rotary-wing

Sumber : <https://www.3dxr.co.uk/multirotor-c3/multirotor-frames-c97/holybro-x500-v2-frame-kit-p5904>

1.9 Software

Pada penelitian ini digunakan Solidworks untuk pemodelan 3D *frame quadcopter* dan ANSYS untuk analisis struktur menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA). Pemilihan kedua perangkat lunak ini didasarkan pada kemampuannya dalam mendukung proses desain, evaluasi kekuatan struktur, serta validasi awal sebelum manufaktur.

1.9.1 *Solidworks*

Solidworks dipilih karena memiliki kemampuan pemodelan 3D parametrik yang memudahkan proses desain, modifikasi dimensi, dan pengembangan alternatif *frame quadcopter*. Dibandingkan perangkat lunak CAD lain, SolidWorks memiliki fitur *assembly* yang baik, antarmuka yang mudah digunakan, serta kompatibel dengan ekspor file manufaktur seperti STL untuk kebutuhan 3D printing. Selain itu, ketersediaan model dan komponen CAD di internet juga cukup luas sehingga mempermudah integrasi komponen *quadcopter* ke dalam desain.

1.9.2 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

1.9.3 *Ansys*

ANSYS dipilih karena memiliki kemampuan analisis struktur yang lengkap untuk pembebanan statik, dinamis, maupun impact. Dibandingkan perangkat lunak

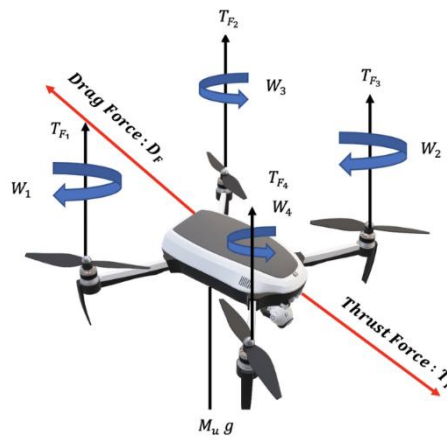
simulasi lain, ANSYS lebih fleksibel dalam pengaturan material, *boundary condition*, *contact*, dan jenis analisis FEA dalam satu lingkungan kerja. ANSYS memiliki fitur *meshing* dan evaluasi hasil yang baik sehingga sesuai untuk menganalisis tegangan, deformasi, regangan, dan *factor of safety* pada *frame quadcopter*.

1.10 Perancangan *Frame quadcopter*

Dalam perancangan *frame quadcopter* ini dengan bahan dasar PETG dan *Carbon Tube* membutuhkan dasar perhitungan yang matang untuk memastikan struktur *frame quadcopter* mampu menahan beban mekanis selama operasi berlangsung. Oleh sebab itu, berbagai perhitungan struktural dan mekanis diperlukan untuk memastikan *frame* memiliki kekuatan dan kekakuan yang memadai sebelum dilakukan proses manufaktur.

1.10.1 *Free Body Diagram Quadcopter*

Kriteria desain Salah satu komponen kritis dalam operasional *quadcopter*, khususnya *quadcopter* yang 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 2.5. Dalam konteks *quadcopter* dengan sistem pembersihan (*cleaning quadcopter*), stabilitas kendali menghadapi tantangan tambahan berupa gaya reaksi semprotan bertekanan tinggi yang bekerja berlawanan arah dengan posisi *quadcopter* terhadap permukaan gedung.



Gambar 2.5 *Free Body Diagram 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 *quadcopter*. Kondisi ini menyebabkan gangguan (*disturbance*) signifikan pada sumbu translasi horizontal yang apabila tidak dikompensasi secara tepat akan mengakibatkan ketidakstabilan posisi *quadcopter* terhadap permukaan yang dibersihkan.

1.10.2 Kriteria Desain *Quadcopter*

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

1. *Quadcopter* Dapat Mengintegrasikan Setiap Komponen

Desain *quadcopter* harus mampu mengintegrasikan seluruh komponen

elektronik yang digunakan dalam sistem, seperti *flight controller*, *brushless motor*, *receiver*, kamera dan modul *telemetry* Integrasi ini penting agar setiap komponen dapat berfungsi secara terkoordinasi dalam mendukung sistem kendali dan navigasi *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. *Frame quadcopter* Mempunyai *Bracket* Untuk Membawa Berbagai Macam *Payload*

Rancangan *quadcopter* harus memilikiudukan atau *bracket* khusus untuk menempatkan payload. Dudukan ini berfungsi untuk menopang komponen seperti selang, *nozzle*, dan komponen pendukung lainnya agar terpasang secara kuat dan tidak mengganggu keseimbangan *quadcopter*.

3. *Quadcopter* Terdapat Proteksi Baling-Baling

Untuk meningkatkan keamanan operasional, *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 *quadcopter* beroperasi di area yang sempit.

4. *Frame Quadcopter* Mampu Mengangkat MTOW 6Kg

Frame quadcopter dirancang untuk mampu menopang dan mengangkat beban maksimum lepas landas (*Maximum Take-Off Weight / MTOW*) sebesar 6 kg. Nilai

MTOW ini mencakup seluruh komponen sistem, yaitu struktur rangka (*frame*), sistem propulsi (motor dan *propeller*), baterai, *flight controller*, serta payload tambahan seperti sistem penyemprot, sensor, dan kamera.

1.10.3 Perhitungan Desain *Frame*

Dalam perancangan desain *frame quadcopter* sangat diperlukan untuk menganalisis apakah desain *frame* yang dibuat memenuhi *safety* yang diizinkan atau tidak. Pehitungan desain *frame* antara lain nilai *thrust* maksimum, total beban operasional, percepatan vertikal, dan lain sebagainya

1. *Maximum Thrust Motor*

Nilai *thrust* maksimum per *motor brushless* diambil dari spesifikasi dari pabrikan motor *brushless*. Jika dalam spesifikasi barikan diberikan dalam satuan gram, maka rumus *thrust* maksimum menjadi (Al-hadithi, 2025) :

$$T(N) = \frac{T(g)}{1000} \times g \quad 2.1$$

Dimana :

$$T(N) = Thrust (N)$$

$$T(g) = Thrust (g)$$

$$g = Gravitasi (m/s^2)$$

2. *Total Thrust Quadcopter*

Nilai total daya dorong *quadcopter* dengan jumlah motor yang dipakai menggunakan rumus sebagai berikut (Al-hadithi, 2025):

$$T_{total} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \quad 2.2$$

3. Beban *Quadcopter*

Rumus untuk mengetahui beban atau berat *quadcopter* dengan menggunakan rumus (Al-hadithi, 2025) :

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

Keterangan :

w = Beban total (N)

m = massa (kg)

g = Gravitasi (m/s^2)

4. Panjang Lengan *Quadcopter*

Panjang lengan ditentukan dari diameter *propeller*, serta penambahan jarak aman (Al-hadithi, 2025) :

$$L \geq \frac{D_{prp}}{2} + c \quad 2.4$$

Keterangan :

L = Panjang Lengan (mm)

D_{prop} = Diameter propeller (mm)

c = Jarak bebas antar baling-baling (15-30 mm)

1.10.4 CAD Modeling

Computer Aided Design (CAD) merupakan proses perancangan model digital tiga dimensi dengan tingkat presisi tinggi yang digunakan untuk merepresentasikan bentuk dan dimensi suatu komponen sebelum diproduksi. Dalam pengembangan *quadcopter*, CAD menjadi tahap awal yang sangat penting karena seluruh parameter

desain seperti ketebalan struktur, bentuk geometri, posisi pemasangan motor, penempatan komponen elektronik, serta kebutuhan ruang untuk jalur kabel harus direncanakan secara akurat agar desain dapat dianalisis dan dioptimalkan sebelum mencapai tahap manufaktur (Gunavendhin M, Nivedhitha G, 2025). *Software* yang digunakan untuk CAD adalah Solidworks 2023. Proses pemodelan CAD ini juga menjadi dasar untuk tahapan *Finite Element Analysis* (FEA), karena model geometris yang dihasilkan diekspor ke format *.STEP* atau *.STL* untuk dianalisis terhadap pembebanan, deformasi, dan tegangan pada struktur.

1.10.5 *Finite Element Analysis* FEA

Finite Element Analysis (FEA) adalah metode analisis numerik yang digunakan untuk mengevaluasi kekuatan dan ketahanan suatu struktur terhadap pembebanan tertentu. Dalam perancangan *frame quadcopter*, FEA menjadi tahap penting untuk memastikan bahwa struktur yang dirancang mampu menahan beban *thrust motor*, serta beban dinamis selama lepas landas, terbang, dan *Impact*. *Software* yang digunakan adalah Ansys Workbench Dengan menggunakan FEA, potensi kegagalan struktural dapat diketahui lebih awal sehingga desain *frame* dapat dioptimalkan sebelum dibuat secara fisik. Analisis ini juga membantu menentukan ketebalan komponen, bentuk geometri *frame*, serta pemilihan material yang paling sesuai dengan kebutuhan kekuatan dan bobot *quadcopter*.

1. *Pre-processing*

Tahap *pre-processing* merupakan bagian awal dari proses FEA yang mencakup seluruh persiapan sebelum simulasi dilakukan. Pada tahap ini, model CAD dari *frame quadcopter* di *input*, material didefinisikan, mesh, dan lain sebagainya serta kondisi

batas diterapkan. Tahap *pre-processing* sangat menentukan akurasi hasil simulasi, karena kesalahan dalam pendefinisian geometri, material, maupun kondisi batas dapat menghasilkan hasil analisis yang tidak *valid*.

A. *Input Geometri*

Tahap *input* geometri merupakan proses memasukkan model tiga dimensi *frame quadcopter* yang telah dirancang menggunakan perangkat lunak CAD ke dalam simulasi *Finite Element Analysis* (FEA). Geometri yang dimasukkan mencakup seluruh komponen utama frame, seperti lengan, center plate, dan dudukan motor, yang disusun sesuai dengan konfigurasi aktual *quadcopter*.

B. Definisi Material

Setelah geometri selesai, material yang digunakan pada *frame quadcopter* didefinisikan dalam perangkat lunak FEA. Material yang umum digunakan adalah PETG dan *Carbon Tube*. Setiap material memiliki parameter mekanik tersendiri, seperti modulus elastisitas, rasio poisson, densitas, kekuatan tarik, dan kekuatan tekan. Nilai-nilai ini sangat penting karena menentukan respons struktur terhadap beban, termasuk deformasi dan distribusi tegangan.

C. Meshing

Meshing adalah proses membagi model geometri menjadi elemen-elemen kecil yang disebut *finite elements*. Elemen-elemen ini memungkinkan perangkat lunak FEA menghitung distribusi tegangan dan deformasi secara detail pada seluruh bagian *frame*. Kualitas mesh yang baik sangat penting untuk mendapatkan hasil simulasi yang dapat dipercaya oleh karena itu perlu dilakukan *meshing grid analysis* sehingga dapat menghasilkan hasil yang optimal. *Grid independence* sangat penting dalam analisis

Finite Element Analysis (FEA) untuk memperoleh solusi yang akurat dan konvergen melalui proses penyempurnaan mesh hingga hasil simulasi tidak lagi mengalami perubahan signifikan. Pemilihan ukuran mesh yang tepat juga diperlukan untuk menjaga keseimbangan antara akurasi simulasi dan efisiensi sumber daya komputasi (Ahmad *et al.*, 2025).

D. *Boundary condition* (kondisi batasan)

Boundary conditions merupakan penentuan kondisi pembebanan dan titik-titik fiksasi pada model sebelum simulasi dijalankan. Pada *frame quadcopter*, kondisi batas biasanya mencakup pengekanan pada titik pemasangan motor atau lengan, serta pemberian beban *thrust* sesuai spesifikasi motor. Tahap ini memastikan bahwa analisis FEA memberikan gambaran yang akurat mengenai bagaimana *frame quadcopter* bereaksi terhadap beban operasional.

1. Massa Per Lengan

Massa per lengan *quadcopter* dapat dicari dengan menggunakan rumus (Al-hadithi, 2025) :

$$\text{Massa per lengan} = \frac{\text{Total massa}}{4} \quad 2.5$$

2. Gaya Per Lengan

Gaya per lengan *quadcopter* dapat dicari dengan menggunakan rumus (Al-hadithi, 2025):

$$F = m \times g \quad 2.6$$

Keterangan :

F = Gaya Per lengan (N)

m = Massa *Quadcopter* (kg)

g = Gravitasi (m/s^2)

3. Total Gaya Semua Lengan

Total gaya semua lengan *quadcopter* dapat dicari dengan menggunakan rumus (Al-hadithi, 2025) :

$$F_{total} = 4 \times F \quad 2.7$$

Keterangan :

F_{total} = Total Gaya (N)

4 = Jumlah Lengan

F = Gaya Per Lengan (N)

2. Solving

Tahap *solving* merupakan proses ketika perangkat lunak FEA melakukan perhitungan numerik berdasarkan geometri, material, *mesh*, dan *boundary conditions* yang telah ditetapkan pada tahap *pre-processing*. ANSYS menghitung distribusi tegangan, regangan, perpindahan, serta respon dinamis dari struktur ketika diberi pembebanan. Pada analisis *frame quadcopter*, proses *solving* ini mencakup simulasi diberbagai kondisi.

3. Post-processing

Post-processing adalah tahap interpretasi dan visualisasi hasil setelah proses *solving* selesai. Pada tahap ini, perangkat lunak menampilkan distribusi tegangan, regangan, deformasi, dan faktor keamanan dalam bentuk grafik, warna kontur, atau animasi untuk memudahkan analisis.

1.10.6 Hasil Simulasi FEA

Simulasi FEA menghasilkan berbagai data numerik dan visual yang dapat digunakan sebagai dasar dalam evaluasi dan penyempurnaan desain:

1. Tegangan

Tegangan (*stress*) adalah besarnya gaya per-satuan luas yang bekerja pada suatu material akibat adanya beban luar. Tegangan menentukan apakah suatu struktur mampu mempertahankan bentuknya atau akan mengalami deformasi dan kegagalan.

Dalam konteks *frame quadcopter*, analisis tegangan sangat penting karena rangka menerima berbagai beban selama operasi, seperti gaya dorong motor, getaran berulang, torsi baling-baling, beban baterai, serta gaya kejut saat pendaratan. *Frame* yang tidak dirancang untuk menahan tegangan dengan baik dapat mengalami patah, retak, atau deformasi permanen, terutama jika material yang digunakan seperti PETG atau *carbon tube*.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad 2.8$$

Keterangan :

σ = Tegangan (N/m²)

F = Gaya Tarik (N)

A = Luas Penampang (m²)

2. Regangan

Regangan (*strain*) merupakan perubahan dimensi atau deformasi yang terjadi pada suatu material ketika menerima gaya atau beban. Regangan menggambarkan seberapa besar peregangan atau pemendekan suatu material dibandingkan dengan

panjang awalnya. Secara matematis, regangan didefinisikan sebagai perbandingan antara perubahan panjang (ΔL) dengan panjang awal material

Pada analisis struktur *frame quadcopter*, regangan digunakan untuk mengetahui respons material PETG dan *Carbon Tube* saat menerima beban *thrust* motor dan gaya berat komponen selama kondisi *hovering*.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad 2.9$$

Keterangan :

ε = Regangan (mm/mm)

ΔL = Perubahan panjang material saat menerima beban (mm)

L_0 = Panjang awal material sebelum diberi beban (mm)

3. Deformasi

Deformasi adalah perubahan bentuk atau ukuran suatu material akibat adanya beban, dan dapat bersifat elastis maupun plastis. Deformasi elastis terjadi ketika material kembali ke bentuk semula setelah beban dihilangkan, sedangkan deformasi plastis menyebabkan perubahan bentuk permanen. Pada *frame quadcopter*, deformasi dapat muncul pada lengan, sambungan, atau dudukan motor ketika *quadcopter* mengalami beban aerodinamis, gaya dorong motor, atau getaran berkelanjutan.

$$\delta = \frac{F L}{A E} \quad 2.10$$

Keterangan :

δ = Deformasi (mm)

F = Gaya yang bekerja (N)

L = Panjang awal material (N)

A = Luas penampang (mm²)

E = Modulus elastisitas material (MPa)

4. *Factor of Safety*

Factor of Safety atau FOS adalah rasio antara kekuatan material terhadap beban maksimum yang diperkirakan terjadi selama penggunaan. Nilai FOS memberikan jaminan bahwa struktur memiliki cadangan kekuatan yang cukup jika terjadi kondisi tak terduga seperti peningkatan beban, benturan, atau degradasi material. Nilai FOS yang disarankan dalam pengaplikasian *frame quadcopter* ini antara 2,0 sampai dengan 3,0 .

$$FoS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{kerja}} \quad 2.11$$

Keterangan :

σ_y = Yield Strength Material (MPa)

σ_{Kerja} = Tegangan maksimum yang terjadi pada struktur

1.11 Skenario simulasi FEA

Pada simulasi FEA *frame quadcopter* ini diterapkan beberapa skenario pembebanan untuk merepresentasikan kondisi *static hovering*, *static full thrust*, *transient full thrust*, dan *explicit dynamic impact at lip braket* untuk memastikan struktur mampu menahan gaya *thrust* serta beban komponen secara aman. Setiap skenario digunakan untuk mengevaluasi respons tegangan, regangan, dan deformasi pada bagian kritis *frame*.

1.11.1 *Static Hovering*

Dalam skenario *Hovering* ini, *quadcopter* disimulasikan pada kondisi terbang stabil, di mana gaya angkat dihasilkan oleh rotor seimbang dengan total berat *quadcopter* (Al-hadithi, 2025).

Analisis ini merepresentasikan kondisi beban struktural dasar yang digunakan sebagai acuan untuk menilai respons struktur terhadap skenario operasional pada saat *hovering*. Pada tahap ini, beban dianggap terdistribusi secara merata pada keempat lengan *quadcopter* sehingga proses evaluasi tegangan, perpindahan, serta faktor keamanan dapat dilakukan secara lebih sederhana.

1.11.2 *Static Full Thrust*

Pada analisis ini, evaluasi struktur *frame quadcopter* dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi beban maksimum yang dapat dihasilkan oleh sistem propulsi, yaitu *thrust* tertinggi yang mampu diberikan oleh motor dan *propeller* (Al-hadithi, 2025)

Beban *thrust* maksimum dianggap terdistribusi pada masing-masing lengan sesuai jumlah motor yang digunakan. Gaya tersebut bekerja dalam arah vertikal dengan kecenderungan menghasilkan momen lentur dan tegangan tarik pada area sambungan dan lengan *frame*. Melalui pendekatan Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*), dianalisis respon struktur terhadap tegangan, deformasi, serta faktor keamanannya sehingga dapat dipastikan bahwa desain *frame* memiliki kekuatan dan kekakuan yang memadai untuk menjamin keselamatan dan keandalan *quadcopter* selama penerbangan.

1.11.3 *Transient Full Thrust*

Pada analisis ini, evaluasi struktur *frame quadcopter* dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi beban dinamis akibat perubahan *thrust* motor secara cepat (*transient*), yang umumnya terjadi saat manuver seperti *take-off*, *landing*, maupun perubahan kecepatan dan arah secara mendadak. Berbeda dengan kondisi statik, beban *transient* bersifat tidak konstan terhadap waktu dan dapat menimbulkan fluktuasi gaya serta percepatan tambahan yang mempengaruhi respons struktur.

Beban *thrust* maksimum *transient* diasumsikan bekerja pada masing-masing lengan sesuai konfigurasi motor, dengan variasi terhadap waktu yang dapat menghasilkan kombinasi tegangan dinamis, momen lentur, serta efek getaran pada struktur. Kondisi ini berpotensi menyebabkan konsentrasi tegangan yang lebih tinggi dibandingkan pembebanan statik, terutama pada area sambungan dan titik kritis *frame*. Melalui pendekatan Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*) dievaluasi respons struktur terhadap tegangan, deformasi, serta karakteristik dinamikanya untuk memastikan bahwa *frame quadcopter* mampu mempertahankan struktural dalam kondisi pembebanan yang berubah secara cepat.

1.11.4 *Explicit Dynamic Impact at Lip Bracket*

Pada analisis ini, evaluasi struktur *frame quadcopter* dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi benturan akibat jatuh (*impact*) pada bagian *lip bracket*. Skenario ini merepresentasikan kondisi ketika *quadcopter* mengalami kegagalan saat pendaratan atau kehilangan kestabilan sehingga bagian *lip bracket* menjadi titik pertama yang bersentuhan dengan permukaan tanah. Kondisi tersebut dipilih karena bagian *lip bracket* merupakan salah satu komponen yang berpotensi menerima beban

tumbukan secara langsung saat terjadi kecelakaan atau pendaratan keras.

Analisis dilakukan menggunakan metode *Explicit Dynamic* untuk memodelkan respons struktur terhadap beban tumbukan yang terjadi dalam waktu sangat singkat. Ketika *lip bracket* membentur permukaan, energi kinetik *quadcopter* akan berubah menjadi energi deformasi yang menghasilkan tegangan dan percepatan tinggi pada area benturan.

1.12 Uji Terbang Pada *Test Bed*

Uji penerbangan pada *test bed* merupakan tahap pengujian awal untuk memastikan seluruh sistem *quadcopter* berfungsi dengan baik sebelum dilakukan uji terbang. Pengujian dilakukan dengan mengoperasikan motor secara bertahap hingga menghasilkan gaya angkat, kemudian diamati kestabilan sistem propulsi, getaran, respons kontrol, dan kekuatan struktur. Hasil pengujian ini menjadi acuan kelayakan UAV untuk melanjutkan ke tahap uji terbang.

1.13 Uji Terbang

Uji penerbangan dilakukan untuk mengevaluasi kondisi struktur *frame quadcopter* setelah beroperasi. Evaluasi dilakukan melalui inspeksi visual pada seluruh bagian *frame*, terutama pada sambungan *carbon tube*, *bracket*, *main frame*, dan *landing gear*. Parameter yang diamati meliputi adanya retakan, deformasi permanen, kerusakan hasil *3D printing*, serta kelonggaran sambungan baut. Hasil inspeksi digunakan untuk memastikan *frame quadcopter* tetap aman dan tidak mengalami kerusakan struktural setelah uji penerbangan.

1.14 Material

Pemilihan material menjadi salah satu faktor penting dalam proses perancangan *frame quadcopter* karena berpengaruh terhadap kekuatan, kekakuan, massa, dan ketahanan struktur saat menerima pembebanan. Material yang digunakan pada *frame quadcopter* terdiri dari *filament* PETG untuk komponen hasil 3D *printing* dan *carbon tube* untuk bagian lengan *frame*. Kedua material dipilih karena memiliki karakteristik mekanik yang sesuai untuk aplikasi *quadcopter*, yaitu ringan namun tetap memiliki kekuatan yang baik.

1.14.1 Filament PETG

Filamen PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*) digunakan sebagai material utama untuk proses pencetakan komponen *frame quadcopter* menggunakan metode 3D *printing*. PETG dipilih karena memiliki kekuatan tarik yang tinggi, sifat fleksibilitas yang baik, tahan terhadap suhu, serta memiliki ketahanan terhadap benturan lebih tinggi dibandingkan PLA (Martins *et al.*, 2024). Tabel 2.1 merupakan material properties yang di input ke dalam Ansys.

Tabel 2.1 *Material Properties* PETG (SUNLU, 2024)

Properti	Nilai	Satuan
<i>Density</i>	1270	kgm^{-3}
<i>Young's Modulus (X-Y)</i>	2990	MPa
<i>Poission's Ratio</i>	0,38	
<i>Yield Strength</i>	44	MPa
<i>Tangent Modulus</i>	150	MPa
<i>Tensile Yield Strength</i>	44	MPa
<i>Tensile Ultimate Strength</i>	55	MPa

1.14.2 Carbon Tube

Carbon tube (tabung serat karbon) digunakan sebagai material utama pada lengan (*arm*) *quadcopter* karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat (*strength-to-weight ratio*) yang sangat tinggi. Material ini tersusun dari serat karbon yang diperkuat dengan matriks polimer (umumnya *epoxy*), sehingga menghasilkan struktur komposit yang ringan namun kaku. Tabel 2.2 merupakan material properties dari Carbon tube.

Tabel 2.2 *Material Properties Carbon Tube* (Performance Composites, 2009)

Properti	Nilai	Satuan
<i>Density</i>	1600	kgm^{-3}
<i>Young's Modulus (X-Y)</i>	70000	MPa
<i>Poisson's Ratio</i>	0,3	
<i>Tensile Yield Strength</i>	600	MPa
<i>Compressive Yield Strength</i>	570	MPa
<i>Tensile Ultimate Strength</i>	600	MPa

1.15 Material Properties

Properti mekanik material merupakan parameter fundamental yang digunakan untuk menggambarkan kemampuan suatu material dalam merespon pembebanan yang diberikan, baik berupa gaya tarik, tekan, maupun lentur. Parameter-parameter ini sangat penting dalam proses perancangan struktur, khususnya pada aplikasi *quadcopter*, karena menentukan kekuatan, kekakuan, serta batas aman material terhadap kemungkinan kegagalan.

Dalam analisis struktur, seperti yang dijelaskan oleh (Gere and Goodno, 2009) dalam *Mechanics of Materials*, hubungan antara tegangan dan regangan menjadi dasar dalam menentukan perilaku material, baik pada daerah elastis maupun plastis. Oleh

karena itu, pemahaman terhadap properti seperti *density*, *Young's modulus*, *yield strength*, hingga *ultimate strength* sangat diperlukan untuk memastikan bahwa material yang digunakan mampu memenuhi kebutuhan desain.

1.15.1 Density

Density (massa jenis) adalah perbandingan antara massa material terhadap volumenya. Properti ini menentukan berat total struktur yang sangat berpengaruh pada performa *quadcopter*, khususnya terhadap *thrust-to-weight ratio*. Material dengan *density* rendah lebih diutamakan untuk aplikasi *quadcopter* agar efisien secara energi.

1.15.2 Young's Modulus

Young's Modulus merupakan ukuran kekakuan material yang menunjukkan hubungan antara tegangan dan regangan pada daerah elastis. Semakin tinggi nilai modulus elastisitas, semakin kecil deformasi yang terjadi saat material diberi beban. Pada material komposit seperti *carbon fiber*, *Young's Modulus* digunakan untuk mengevaluasi kekakuan material terhadap berbagai arah pembebanan karena sifat anisotropik material komposit.

1.15.3 Tensile Strength

Tensile Strength adalah tegangan maksimum yang dapat ditahan material sebelum mengalami kegagalan akibat tarikan. Parameter ini penting untuk memastikan material tidak patah saat menerima beban tarik selama operasi.

1.15.4 Poission's Ratio

Poisson's Ratio adalah rasio antara regangan lateral terhadap regangan aksial ketika material diberi beban. Nilai ini menggambarkan seberapa besar perubahan dimensi material ke arah samping saat ditarik atau ditekan.

1.15.5 *Yield Strength*

Yield Strength merupakan batas tegangan di mana material mulai mengalami deformasi plastis (tidak kembali ke bentuk semula). Nilai ini menjadi acuan utama dalam desain untuk menghindari kegagalan permanen.

1.15.6 *Tangent Modulus*

Tangent Modulus adalah kemiringan kurva tegangan-regangan setelah melewati batas elastis. Properti ini digunakan untuk menggambarkan perilaku material pada daerah plastis, khususnya dalam analisis non-linear.

1.15.7 *Tensile Ultimate Strength*

Tensile Ultimate Strength adalah tegangan maksimum tertinggi yang dapat dicapai material sebelum terjadi kegagalan total (fracture). Nilai ini biasanya lebih tinggi dari yield strength dan digunakan sebagai batas maksimum dalam analisis kekuatan material.