

INTEGRASI SENSOR GPS DAN QUAD MOTOR DENGAN SISTEM OTONOM PADA UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV) VERTIKAL TAKEOFF AND LANDING (VTOL) QUADPLANE UNTUK MENINGKATKAN EFESIENSI ENERGI SAAT LEPAS LANDAS DAN PENDARATAN

1st Bintang Mulya Prima
Fakultas Teknik elektro
Teknik elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

bintangmulya@student.telkomuniversit
y.ac.id

2nd Angga Rusdinar
Fakultas teknik elektro
teknik elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

anggarusdinar@telkomuniversity.ac.id

3rd Duddy Soegiarto
Fakultas Teknik elektro
Teknik elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

Duddysoegiarto@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Penelitian ini membahas perancangan dan implementasi sistem integrasi sensor Global Positioning System (GPS) dan quad motor dalam mode Vertikal Takeoff and Landing (VTOL) pada UAV tipe quadplane. Tujuan utama dari integrasi ini adalah untuk meningkatkan efisiensi energi saat proses lepas landas dan pendaratan, yang umumnya membutuhkan konsumsi daya tinggi. Dengan menggunakan flight controller Pixhawk, sensor GPS, serta konfigurasi quad motor, sistem dirancang untuk bekerja secara otonom dalam menentukan waktu dan ketinggian transisi ke mode fixed-wing. Metode pengujian dilakukan dengan pencatatan data penerbangan seperti tegangan, arus, waktu, dan ketinggian untuk menghitung konsumsi daya dan efisiensi energi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa ketinggian optimal transisi ke mode cruise berada di sekitar 21 meter dengan efisiensi baterai terbaik. Data ketinggian dari GPS juga diverifikasi melalui pengukuran manual menggunakan meteran. Hasilnya menunjukkan bahwa integrasi sistem ini efektif dalam mendukung navigasi otonom UAV VTOL, dengan akurasi data ketinggian yang baik dan efisiensi energi yang meningkat.

Kata kunci - *Vertical Takeoff and Landing (VTOL), Quadplane, Global Positioning System (GPS), Quad Motor, Efisiensi Energi, Ketinggian*

I. PENDAHULUAN

Unmanned Aerial Vehicle (UAV) merupakan teknologi yang digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti pemantauan, pemulihan bencana, dan operasi pencarian dan penyelamatan. UAV terdiri dari dua tipe utama, yaitu fixed-wing dan multi-rotor. UAV fixed-wing memiliki efisiensi jelajah yang baik, namun membutuhkan area landasan yang luas dan rentan terhadap gangguan angin. Sebagai solusi, UAV dengan kemampuan Vertical Take-Off and Landing (VTOL), seperti Quadplane, dikembangkan, yang

menggabungkan manuver vertikal dari multi-rotor dan efisiensi jelajah dari fixed-wing. UAV jenis ini dapat lepas landas dan mendarat secara vertikal tanpa memerlukan landasan luas, ideal untuk digunakan di medan sulit dijangkau [1][2].

Hasil penelitian di kawasan Hutan Alam Gunung Manglayang, Kabupaten Bandung, menunjukkan bahwa kelas tinggi pohon yang mendominasi berada pada stratum C (4–20 meter) [3]. Oleh karena itu, UAV idealnya beroperasi di atas ketinggian 21 meter untuk menghindari potensi tabrakan dengan vegetasi tinggi dan meningkatkan keamanan penerbangan, terutama saat proses lepas landas dan pendaratan di lingkungan berhutan.

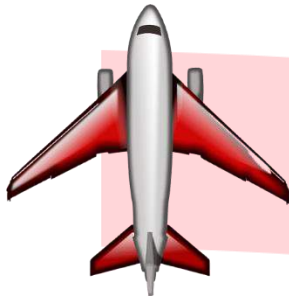
Namun, dalam fase takeoff dan landing, UAV Quadplane membutuhkan konsumsi daya yang sangat tinggi. Oleh karena itu, optimasi sistem navigasi dan propulsi menjadi penting untuk mengurangi pemborosan energi dan meningkatkan efisiensi. GPS memiliki peran krusial dalam menentukan posisi dan orientasi UAV, serta dalam menentukan waktu dan ketinggian transisi yang tepat antara mode VTOL dan fixed-wing, sehingga konsumsi daya dapat diminimalkan [4][5]. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis ketinggian transisi yang optimal dan mengevaluasi akurasi pembacaan ketinggian GPS dalam mendukung transisi yang efisien pada UAV Quadplane.

II. KAJIAN TEORI

A. Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

UAV merupakan sebuah teknologi wahana udara tanpa awak yang dapat dikendalikan dari jarak jauh oleh seorang pilot ataupun mampu mengendalikan dirinya sendiri[1]. UAV juga dapat memberikan keputusan, waktu aktual, dan kemampuan pengawasan berkelanjutan yang dapat menghiasi kesadaran situasional dan pengambilan Keputusan pengguna[6]. Terdapat dua jenis UAV yang digunakan yaitu *fixed-wing* dan *multi-rotor* [4]

1. Fixed Wing



fixed wing menyerupai pesawat terbang komersil[1]. *System* ini dirancang untuk terbang dalam jarak yang jauh dan memiliki efisiensi energi yang lebih baik. Namun, membutuhkan sebuah landasan yang cukup luas

2. Multi-rotor



UAV jenis *multi-rotor* tidak memiliki sayap seperti pesawat konvensional, tetapi menggunakan baling baling di setiap lengannya sebagai penghasil *Thrust Force*[4]. Mereka dapat landas dan mendarat secara *vertical*.

B. Quadplane



Quadplane merupakan UAV yang menggabungkan fitur multi-rotor dan fixed-wing. Sistem ini mampu melakukan manuver vertikal seperti quadcopter dan melanjutkan jelajah

dengan efisiensi tinggi dalam mode fixed-wing. Keunggulan ini membuat quadplane ideal untuk operasi di area sempit atau sulit diakses [7].

C. Global Positioning System (GPS) dan altimeter pada UAV

Sebagian besar UAV masih dikendalikan secara manual, namun sistem GPS pada UAV tidak hanya berfungsi untuk menerima sinyal satelit, tetapi juga untuk pelacakan lokasi secara real-time[8], yang dapat menentukan arah dan memberikan data orientasi yang akurat. Navigasi otonom memungkinkan UAV VTOL untuk beradaptasi dengan medan yang rumit dan beralih ke mode hover[9]. Selain GPS, altimeter jenis tekanan udara juga digunakan untuk mengukur ketinggian relatif terhadap permukaan laut. Kolaborasi data GPS dan altimeter memungkinkan UAV untuk mempertahankan stabilitas terbang, terutama dalam manuver otomatis yang membutuhkan pengendalian posisi vertikal dengan akurat.

C. Konsumsi daya dan efisiensi energi UAV

Selama penerbangan, terutama pada mode VTOL, sistem motor vertikal bekerja ekstra untuk menjaga kestabilan dan mengangkat UAV. Hal ini menyebabkan peningkatan arus Listrik yang signifikan, sehingga konsumsi daya menjadi lebih besar. Untuk mengetahui seberapa hemat energi yang digunakan selama fase VTOL, perlu dilakukan perhitungan terhadap jumlah energi yang dipakai serta Tingkat efisiensinya pada tiap ketinggian yang diuji.

Energi potensial (E_p) UAV saat berada pada ketinggian tertentu dapat dihitung dengan persamaan[15]:

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad (2.1)$$

E_p = Energi Potensial (Joule)

m = massa UAV (kg)

g = percepatan gravitasi (10 m/s^2)

h = ketinggian (m)

Persamaan ini digunakan untuk mengetahui jumlah energi potensial yang tersimpan pada UAV saat berada di ketinggian tertentu, yang menjadi indikator besarnya usaha yang dibutuhkan untuk mengangkat UAV ke titik tersebut.

Energi kinetik UAV saat bergerak dengan kecepatan tertentu dapat dihitung dengan persamaan[16]:

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2.2)$$

Energi (E) yang digunakan dihitung berdasarkan besar arus dan waktu UAV bekerja [17]:

$$E = P \cdot t \quad (2.3)$$

E = Energi yang digunakan (Joule)

P = Daya (Watt)

t = Waktu (s)

Persamaan ini digunakan untuk menghitung total energi listrik yang dikonsumsi UAV selama fase penerbangan tertentu, sehingga dapat dibandingkan dengan energi potensial yang dihasilkan.

Daya (P) sendiri diperoleh dari hasil perkalian antara tegangan (V) dan arus listrik (I), yaitu [18]:

$$P = V \cdot I \quad (2.4)$$

P = Daya (Watt)

V = Voltage (V)

I = Current (A)

Persamaan ini digunakan untuk mengetahui besar daya sesaat yang dipakai UAV pada kondisi tertentu, yang kemudian menjadi komponen penting dalam menghitung konsumsi energi total.

Dengan membalik relasi tersebut, diperoleh rumus efisiensi :

$$Efisiensi = \frac{E_p}{P} \quad (2.5)$$

E = Energi yang digunakan (Joule)

E_p = Energi Potensial

P = Daya (Watt)

Persamaan ini digunakan untuk menilai seberapa efektif daya listrik yang dipakai UAV dalam menghasilkan energi potensial, sehingga dapat dijadikan tolak ukur hemat atau borosnya sistem saat fase VTOL.

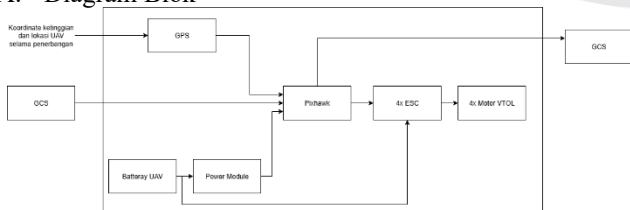
D. Vertikal takeoff and landing



VTOL Quadplane merupakan inovasi yang menggabungkan kemampuan manuver vertikal drone dengan efisiensi aerodinamika pesawat sayap tetap. Selain itu, VTOL ini menawarkan fleksibilitas dalam bermanuver, sehingga tidak memerlukan landasan pacu atau peluncur [13]. sehingga sangat cocok digunakan di area terbatas atau medan sulit. VTOL memiliki keunggulan dalam fleksibilitas dalam penerbangan. Pada penelitian ini, UAV VTOL digunakan untuk pemantauan hutan dengan kemampuan mode hover[14]. Dalam penelitian ini, UAV VTOL digunakan dengan fokus pada performa saat proses lepas landas dan pendaratan vertikal,[14]. Dengan demikian, UAV dapat melakukan pemantauan secara efektif di lingkungan yang kompleks.

III. METODE

A. Diagram Blok

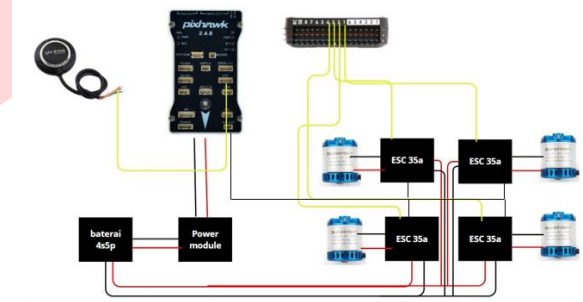


Pada Gambar 3.2, sistem kerja utama UAV dengan kemampuan Vertikal Take-Off and Landing (VTOL) dimulai dari baterai yang menyediakan daya utama untuk komponen. Daya dari baterai dialirkan melalui power module yang mengatur distribusi energi dan tegangan untuk setiap komponen, kemudian diteruskan ke Pixhawk sebagai flight controller. Pixhawk bertugas mengontrol motor berdasarkan

informasi GPS dan perintah dari Ground Control Station (GCS). GPS memberikan data posisi dan kecepatan yang diproses oleh Pixhawk untuk navigasi yang akurat. Sinyal kontrol dari Pixhawk dikirim ke Electronic Speed Controller (ESC) untuk mengatur kecepatan motor VTOL, yang kemudian menghasilkan daya dorong untuk take-off, mendarat, dan bermanuver. GCS terus memantau status penerbangan dan lokasi UAV secara real-time. Sistem ini didesain dengan integrasi efisien untuk mendukung kemampuan VTOL, memastikan UAV beroperasi dengan stabil dan fleksibel.

B. Desain Perangkat Keras

Gambar berikut menunjukkan desain perangkat keras sistem yang digunakan dalam penelitian ini, yang mencakup komponen-komponen utama dan konfigurasi interkoneksi antar perangkat dalam implementasi sistem. Desain ini dirancang untuk memastikan kinerja yang optimal sesuai dengan tujuan penelitian.



C. Spesifikasi Komponen

perancangan sistem integrasi sensor gps dan quad motor dengan sistem otonom pada *unmanned aerial vehicle* (uav) *vertical takeoff and landing* (vtol) quadplane untuk meningkatkan efisiensi energi saat lepas landas dan pendaratan ini membutuhkan komponen – komponen pendukung untuk merealisasikan sistem ini. Berikut merupakan spesifikasi komponen yang digunakan :

No.	Unsur Pembentukan Sistem	Jenis Komponen	Komponen terpilih
1.	Detektor	GPS	GPS M8n Ublox
2.	Flight Controller	Flight Controller	Pixhawk 2.4.8
3.	Aktuator	Motor brushless	SunnySky X2216 V3
		Electronic Speed Controller	BL heli 35a

B. pengujian peran GPS dalam UAV

No	Altimeter Pixhawk(m)	GPS altitude(m)
1	5	5
2	6,3	6,8
3	7,5	7,2
4	8	8
5	9	9
6	10	10
7	11	11
8	12	12
9	13	13
10	14	14
11	15	15
12	16,2	16,8
13	17,5	17
14	18,5	18,8
15	19	19,5
16	20,1	20,3

Tabel 4.2 menyajikan hasil pengukuran ketinggian dari dua jenis sensor, yaitu altimeter bawaan flight controller Pixhawk dan sensor GPS pada sistem UAV. Data disusun berdasarkan urutan kenaikan ketinggian, mulai dari pembacaan altimeter sebesar 5 meter hingga 20,1 meter. Kolom pertama memuat nomor pengukuran (1–16). Kolom kedua menunjukkan data ketinggian dari altimeter Pixhawk, yang secara umum meningkat bertahap dari 5 meter pada pengukuran awal hingga 20,1 meter pada pengukuran ke-16. Kolom ketiga berisi data ketinggian dari sensor GPS (setelah dikoreksi dengan pengurangan nilai referensi 1100 meter), yang dimulai dari 5 meter pada pengukuran awal hingga 20,3 meter pada pengukuran akhir. Beberapa pembacaan GPS memiliki nilai desimal, seperti 6,8 meter, 7,2 meter, dan 16,8 meter.

Pengambilan data dilakukan saat UAV diterbangkan secara bertahap pada ketinggian yang terus meningkat. Kedua sensor mencatat pembacaan secara berurutan untuk setiap level ketinggian yang sama, sehingga memungkinkan perbandingan langsung antara hasil altimeter Pixhawk dan sensor GPS pada setiap titik pengukuran.

C. Hasil pengujian efektifitas baterai pada mode Quadplane

Elapse time(s)	Voltage(v)	arus (a)	Daya(w) $P=V \times I$	Energi potensial $E_p=m \cdot g \cdot h$	Ketinggian (m)	Energi(j) $E=P \cdot t$	Efisiensi(J) $E_f=E_p/E$
16.42.03=0	0	0	0	0	0	0	0
16.42.06=5	16,2	25	405	988	26	2.025	48,78
16.42.10=10	16,1	28	450,8	1.140	30	2.254	50,58
16.42.14=15	16,1	26	418,6	1.254	33	2.093	59,58
16.42.19=20	16	27	432	1.292	34	2.160	59,81
15.42.23=25	15,9	25	397,5	1.178	31	1.987,5	59,28
15.42.27=30	15,9	26	413,4	1.102	29	2.067	53,3
15.42.33=35	15,8	27	426,6	1.216	32	2.133	57,01
15.42.38=40	15,8	26	410,8	1.140	30	2.054	55,51
15.42.42=45	15,7	25	392,5	1.064	28	1.962,5	54,23

Tabel 4.3 menyajikan hasil pengukuran konsumsi energi pada beberapa titik waktu selama pengujian transisi UAV dari mode VTOL ke fixed-wing. Parameter yang direkam meliputi waktu, tegangan (V), arus (A), daya listrik (W), energi potensial (Ep, joule), ketinggian (m), energi total (E, joule), dan efisiensi sistem (%). Daya dihitung dari hasil perkalian tegangan dan arus ($P = V \times I$) (2.1), sedangkan energi total diperoleh dari hasil perkalian daya dengan waktu kumulatif ($E = P \times t$) (2.2). Energi potensial ditentukan

dengan rumus $E_p = m \times g \times h$ (2.3), dan efisiensi dihitung sebagai rasio energi potensial terhadap energi total ($E_f = E_p / E \times 100\%$) (2.4).

Hasil pengukuran menunjukkan penurunan tegangan dari 16,2 V pada detik ke-5 menjadi 15,7 V pada detik ke-45, dengan arus bervariasi antara 25–28 A, mengindikasikan perubahan beban motor selama fase pendakian. Daya listrik awal tercatat sebesar 405 W dan berfluktuasi di kisaran 392,5–450,8 W. Energi potensial meningkat seiring kenaikan ketinggian, dari 988 J pada 26 m hingga 1.292 J pada 34 m, kemudian sedikit menurun ketika ketinggian berkurang di akhir pengujian. Energi total berkisar antara 1.962,5–2.254 J, mengikuti dinamika daya dan waktu.

Efisiensi tertinggi tercatat sebesar 59,58% pada ketinggian 33 m ($t = 14$ s) dan terendah 48,78% pada awal pengujian ($t = 5$ s). Pola ini menunjukkan bahwa pada fase tengah pendakian, proporsi energi listrik yang dikonversi menjadi energi potensial lebih besar, sedangkan pada awal dan akhir pendakian sebagian energi digunakan untuk mengatasi hambatan udara dan menjaga kestabilan UAV. Karakteristik ini menggambarkan perilaku transisi VTOL–fixed wing, di mana efisiensi meningkat saat kecepatan pendakian optimal dan menurun saat beban sistem bertambah atau ketinggian stabil.

D. Hasil pengujian Efektifitas baterai pada mode

Quadcopter

Elapse time(s)	Voltage(v)	arus (a)	Daya(w) $P=V \times I$	Energi potensial $E_p=m \cdot g \cdot h$	Ketinggian (m)	Energi(j) $E=P \cdot t$	Efisiensi(J) $E_f=E_p/E$
08.27.03=0	0	0	0	0	0	0	0
08.27.06=3	16,7	22	367,4	456	12	1.102,2	41,37
08.27.10=7	16,6	23	381,8	570	15	2.672,6	21,34
08.27.14=11	16,5	24	396	684	18	4.356	15,70
08.27.19=16	16,4	24	393,6	798	21	6.297,6	12,67
08.27.23=20	16,4	25	410	912	24	9.840	9,26
08.27.27=24	16,3	26	423,8	1.026	27	11.442,6	8,97
08.27.33=27	16,2	27	437,4	1.102	29	11.809,8	9,33
08.27.38=28	16,1	27	434,7	1.140	30	12.606,3	9,04
08.27.42=29	16,1	28	450,8	1.159	30,5	13.073,2	8,87
08.27.47=30	16	29	464	1.178	31	13.920	8,46
08.27.51=31	15,9	30	477	1.216	32	14.787	8,22
08.27.55=34	15,9	30	477	1.292	34	16.218	7,58
08.27.59=36	15,8	30	474	1.349	35,5	17.064	7,91
08.27.03=39	15,8	31	489,8	1.406	37	19.102,2	7,36
08.27.07=43	15,7	32	502,5	1.502	40	21.607,5	6,95

Tabel 4.4 menyajikan hasil pengukuran konsumsi energi pada beberapa titik waktu selama pengujian transisi UAV dari mode VTOL ke fixed-wing. Parameter yang dicatat meliputi waktu, tegangan (V), arus (A), daya listrik (W), energi potensial (Ep, joule), ketinggian (m), energi total (E, joule), dan efisiensi sistem (%). Daya dihitung melalui perkalian tegangan dan arus ($P = V \times I$) (2.1), energi total diperoleh dari perkalian daya dengan waktu kumulatif ($E = P \times t$) (2.2), energi potensial dihitung menggunakan rumus $E_p = m \times g \times h$ (2.3), sedangkan efisiensi ditentukan sebagai rasio energi potensial terhadap energi total ($E_f = E_p / E \times 100\%$) (2.4), yang menggambarkan perbandingan energi yang tersimpan dalam bentuk ketinggian terhadap energi listrik yang digunakan.

Hasil pengukuran menunjukkan penurunan tegangan dari 16,7 V pada detik ke-3 menjadi 15,7 V pada detik ke-64, disertai kenaikan arus dari 22 A menjadi 32 A, yang mengindikasikan peningkatan beban motor seiring durasi terbang. Daya listrik awal tercatat sebesar 367,4 W dan meningkat hingga 502,5 W pada akhir pengujian. Energi potensial bertambah seiring kenaikan ketinggian, dari 456 J pada 12 m hingga 1.502 J pada 40 m. Energi total meningkat signifikan, dari 1.102,2 J pada awal pengujian menjadi 32.160 J pada akhir pengujian.

Efisiensi tertinggi tercatat sebesar 41,37% pada fase awal (ketinggian 12 m, $t = 3$ s), kemudian menurun bertahap hingga sekitar 4,67% pada ketinggian 40 m. Pola ini menunjukkan bahwa pada awal pendakian, proporsi energi listrik yang berhasil dikonversi menjadi energi potensial relatif tinggi. Namun, pada fase berikutnya, semakin besar porsi energi yang digunakan untuk mempertahankan ketinggian, mengatasi hambatan udara, dan menjaga stabilitas penerbangan, sehingga efisiensi konversi menurun. Karakteristik ini sesuai dengan perilaku UAV VTOL, di mana konsumsi daya tinggi terjadi pada awal lepas landas vertikal, diikuti penurunan efisiensi saat beban sistem meningkat seiring waktu terbang.

E. Pengujian efektifitas baterai pada mode *fixed-wing*

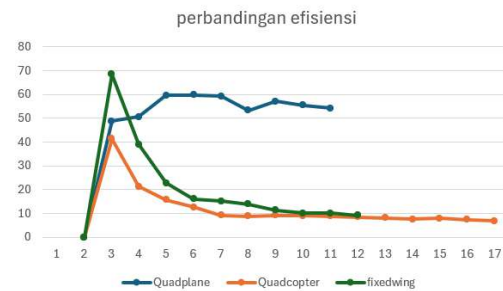
Time	Tegangan (V)	Arus(A)	Daya(w)	Energi Kinetik	Airspeed	Energi	Efisiensi(J) $E_f = E_k / E$
10.54.58=0	0	0	0	0	0	0	0
10.55.05=7	14,3	12,8	183,04	878,28	21,5	1281,28	68,55
10.55.11=13	14,2	12,9	183,18	927,98	22,1	2381,34	38,97
10.55.18=20	14,1	13	183,3	837,9	21,	3666	22,86
10.55.25=27	14	13,2	184,8	806,28	20,6	4989,6	16,16
10.55.30=32	13,9	13,3	184,87	902,96	21,8	5915,84	15,26
10.55.35=37	13,8	13,4	184,92	953,34	22,4	6842,03	13,93
10.55.41=43	13,8	13,5	186,3	911,26	21,9	8010,90	11,38
10.55.46=48	13,7	13,8	189,06	919,6	22	90,74,88	10,13
10.5.42=44	13,6	14,2	193,12	862,01	21,3	8497,28	10,14
10.55.47=49	13,6	14,4	195,84	894,69	21,7	9596,16	9,32

Tabel 4.5 menyajikan hasil pengukuran konsumsi energi pada beberapa titik waktu selama uji terbang UAV tipe fixed wing. Parameter yang dicatat meliputi waktu, elapse time (detik), tegangan (V), arus (A), daya listrik (W), kecepatan udara (airspeed, m/s), energi (J), serta efisiensi sistem (m/J). Perhitungan daya dilakukan dengan mengalikan tegangan dan arus ($P = V \times I$) sesuai persamaan (2.1), sedangkan energi diperoleh dari hasil perkalian daya dengan waktu ($E = P \times t$) sesuai persamaan (2.2). Efisiensi ditentukan dari rasio kecepatan udara terhadap energi ($E_{\text{Efisiensi}} = \text{Airspeed} / E$) sebagaimana persamaan (2.3), yang menunjukkan kemampuan sistem menghasilkan kecepatan per satuan energi.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa seiring bertambahnya waktu dan perubahan kecepatan udara, nilai daya dan energi yang digunakan mengalami fluktuasi. Peningkatan arus diikuti kenaikan daya dan energi, menandakan beban motor lebih besar untuk mempertahankan atau meningkatkan kecepatan. Nilai efisiensi (m/J) pada UAV fixed wing tercatat lebih tinggi dibandingkan tipe VTOL, yang mengindikasikan kemampuan menghasilkan kecepatan udara lebih besar per satuan energi. Variasi efisiensi di beberapa titik

mencerminkan adanya perubahan kondisi aerodinamika dan beban mesin selama penerbangan.

F. hasil pengujian efektifitas baterai pada mode *Quadplane*, *Quadcopter*, *Fixed Wing*



Berdasarkan hasil pengujian efektifitas baterai pada tiga mode penerbangan UAV—Quadplane, Quadcopter, dan Fixed Wing—yang ditampilkan pada Gambar 4.17, terlihat perbedaan signifikan dalam karakteristik konsumsi energi dan tingkat efisiensi masing-masing mode. Perbedaan ini dipengaruhi oleh faktor aerodinamika, mekanisme pengangkatan (lift), dan strategi penggunaan daya pada setiap mode.

Pada mode Quadplane, UAV memadukan kemampuan Vertical Take-Off and Landing (VTOL) seperti Quadcopter dengan efisiensi terbang khas Fixed Wing. Mode ini mencatat efisiensi tertinggi di antara ketiga mode, dengan capaian maksimum 59,81% pada ketinggian 34 m. Peningkatan efisiensi terjadi pada fase transisi optimal, ketika UAV beralih dari gaya angkat vertikal menuju dukungan aerodinamis sayap. Pada fase pertengahan pendakian, beban motor berkurang karena kontribusi lift sayap, sehingga rasio konversi energi listrik menjadi energi potensial meningkat. Stabilitas daya juga terjaga, ditandai dengan fluktuasi tegangan dan arus yang relatif kecil.

Sebaliknya, mode Quadcopter yang sepenuhnya mengandalkan rotor vertikal menunjukkan penurunan efisiensi tajam seiring bertambahnya ketinggian. Efisiensi awal sebesar 41,37% pada ketinggian 12 m turun hingga di bawah 7% pada 40 m. Hal ini disebabkan oleh tingginya kebutuhan daya untuk mempertahankan hover atau pendakian tanpa bantuan lift aerodinamis, sehingga konsumsi energi meningkat tajam sementara kenaikan ketinggian tidak sebanding. Kondisi ini membuat Quadcopter kurang efisien untuk misi dengan pendakian tinggi atau durasi terbang panjang.

Mode Fixed Wing memiliki prinsip kerja berbeda, dengan efisiensi diukur dari rasio kecepatan jelajah (airspeed) terhadap energi yang digunakan. Sistem ini mampu mempertahankan penerbangan horizontal dengan konsumsi daya rendah karena lift dihasilkan oleh desain aerodinamis sayap. Nilai efisiensi m/J cenderung stabil dan unggul dalam jarak tempuh per energi dibandingkan VTOL murni, meskipun tidak optimal

untuk pendakian vertikal. Mode ini lebih cocok untuk misi jarak jauh dengan ketinggian konstan.

Secara keseluruhan, Quadplane merupakan mode paling efisien dalam konversi energi listrik menjadi energi potensial pada fase pendakian. Kombinasi fleksibilitas lepas landas ala VTOL dan efisiensi aerodinamis sayap menghasilkan performa energi yang seimbang, mengurangi beban motor, dan memaksimalkan pemanfaatan daya baterai. Mode ini menawarkan keunggulan strategis untuk misi yang membutuhkan efisiensi pendakian sekaligus kemampuan jelajah tinggi.

V. KESIMPULAN

1. Sistem integrasi GPS dan quad motor berhasil diterapkan dengan baik pada UAV VTOL Quadplane, terutama dalam mendukung sistem navigasi otonom selama proses lepas landas dan pendaratan.
2. Sensor GPS menunjukkan akurasi tinggi dalam membaca ketinggian absolut (MSL) dan memiliki keunggulan dalam memberikan data stabil dibandingkan dengan altimeter barometrik, sehingga sangat layak digunakan sebagai acuan navigasi dalam sistem otomatis UAV.
3. Hasil perbandingan antara data ketinggian GPS dengan pengukuran manual menggunakan meteran menunjukkan rata-rata akurasi di atas 95%, dengan error margin di bawah $\pm 5\%$, yang artinya GPS cukup andal dalam membaca ketinggian sebenarnya.
4. Ketinggian transisi optimal dari mode VTOL ke fixed-wing ditemukan pada kisaran 20–25 meter, karena selain lebih efisien dalam penggunaan energi, juga mempertimbangkan faktor keamanan penerbangan terhadap vegetasi tinggi di Indonesia.
5. Efisiensi baterai paling tinggi tercatat pada ketinggian sekitar 21 meter, di mana UAV hanya menggunakan sekitar 0,8% dari total kapasitas baterai untuk mencapai ketinggian tersebut. Ini menunjukkan bahwa sistem sangat efisien dalam penggunaan daya pada titik ketinggian tertentu.
6. Dengan menggabungkan fixed-wing dan VTOL ke dalam satu platform UAV, yaitu Quadplane, sistem ini mampu menjawab tantangan keterbatasan *fixed-wing* dalam kebutuhan landasan luas.

VI. SARAN

Untuk pengembangan lebih lanjut dari penelitian ini, ada beberapa saran yang dapat diberikan agar sistem dapat lebih optimal antara lain:

1. Pengujian sistem dilakukan di kondisi cuaca ekstrem untuk mengukur sistem dalam situasi yang lebih banyak
2. Uji coba UAV di medan yang lebih beragam untuk menilai ketahanan dan efisiensi dalam berbagai kondisi lingkungan

REFERENSI

- [1] Hilman abdurahman, M. S. i Drs. Suwandi, and M. S. Dra. Endang Rosdiana, "PERANCANGAN DAN PERAKITAN FIXED WING UAV YANG DAPAT LEPAS LANDAS SECARA VERTIKAL," *e-Proceeding of Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 1266–1273, Apr. 2020.
- [2] M. L. Hakim *et al.*, "Development of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Fixed-Wing for Monitoring, Mapping and Dropping applications on agricultural land," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Dec. 2021. doi: 10.1088/1742-6596/2111/1/012051.
- [3] Tri Cahyanto, Destiana Chairunnisa, and Tony Sudjarwo, "ANALISIS VEGETASI POHON HUTAN ALAM GUNUNG MANGLAYANG KABUPATEN BANDUNG," vol. 2, pp. 145–149, Jul. 2014, Accessed: Aug. 04, 2025. [Online]. Available: <https://123dok.com/document/q5wnwrjq-tap-com-edisi-agustus-volume-viii-issn-jurnal.html>
- [4] Agus Sofwan, M Ikrar Yamin, and Budi Santoso, "SISTEM PENGENDALIAN KESTABILAN PESAWAT TANPA AWAK BERBASIS KONTROL PID," vol. 25, no. 1, pp. 42–51, Jul. 2023.
- [5] D. Aláez, X. Olaz, M. Prieto, J. Villadangos, and J. J. Astrain, "VTOL UAV digital twin for take-off, hovering and landing in different wind conditions," *Simul Model Pract Theory*, vol. 123, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.simpat.2022.102703.
- [6] Raja Vavekanand, Kira Sam, and Vijay Singh, "UAV Networks Surveillance Implementing an Effective LoadAware Multipath Routing Protocol (ELAMRP)," *International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT)*, pp. 1–6, 2024.
- [7] A. Mathur and E. Atkins, "Wind Tunnel Testing and Aerodynamic Characterization of a QuadPlane Uncrewed Aircraft System," Jan. 2023, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2301.12316>
- [8] Qori Dermawan, Muhammad Sadli, and Andik Bintoro, "PENGUNAAN MOTOR DC BRUSHLESS SUNNY SKY X2212-13 KV: 980 II PADA PERANCANGAN QUADCOPTER," *Jurnal Energi Elektrik*, vol. 7, pp. 38–46, 2018.

- [9] E. Irmawan, "KENDALI MODE TRANSISI HOVER TO CRUISE PADA PESAWAT TANPA AWAK VTOL FIXED WING," 2017.
- [10] Kamal N, *Memahami Rumus Daya Listrik dan Contoh Soalnya*. Accessed: Jul. 31, 2025. [Online]. Available: https://www.gramedia.com/literasi/rumus-daya-listrik/?srsltid=AfmBOopN8qvzP4MbvgBERguaiPS0QR099peuLzLyj_7226Of3kqxsPVT
- [11] Fadil Rianno, *4 Rumus Daya Listrik dalam Fisika Beserta 3 Contoh Soal*. Accessed: Jul. 31, 2025. [Online]. Available: <https://www.zenius.net/blog/rumus-daya-listrik/>
- [12] R. S. Ii, R. Rubio, G. Gorospe, and L. Sun, "Comparison Study of Machine Learning Techniques to Predict Flight Energy Consumption for Advanced Air Mobility."
- [13] A. Prakoso, A. Pambekti, C. S. Budiono, I. Lukito, R. Kurniawan, and S. D. S. Vong, "Perancangan dan analisis karakteristik aerodinamik pada pesawat fix wing VTOL UAV," *Angkasa: Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi*, vol. 15, no. 1, p. 1, May 2023, doi: 10.28989/angkasa.v15i1.1373.
- [14] E. Irmawan, "KENDALI MODE TRANSISI HOVER TO CRUISE PADA PESAWAT TANPA AWAK VTOL FIXED WING," 2017.
- [15] *Calculate Battery Capacity*. Accessed: Aug. 03, 2025. [Online]. Available: https://sourcetable.com/calculate/how-to-calculate-battery-capacity?utm_source=chatgpt.com