

PERANCANGAN QUADCOPTER F450 DENGAN FLIGHT CONTROLLER PIXHAWK 2.4.8 SEBAGAI ALAT DETEKSI KERETAKAN

Anggara Adhi Pasanca¹, Munadi², Muchammad²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: anggarapasanca@gmail.com

Abstrak

Teknologi UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) sebagai kendaraan udara tanpa awak dalam sejarahnya pertama kali diinisiasi dalam dunia teknologi militer. Namun saat ini sudah banyak berbagai inovasi terkait penggunaan UAV sebagai alat bantu di dalam bidang konstruksi, pertanian, logistik, dan lain-lain. Dalam penggunaan UAV, tidak semua lancar, salah satunya penggunaan UAV berjenis *quadcopter* (Tipe: DJI Mavix Mini II) yang digunakan sebagai alat deteksi keretakan bangunan bermaterial beton. Penggunaan UAV tersebut masih terdapat permasalahan terkait pengendalian saat melakukan gerakan *hover*. Hasilnya terdapat *error* pengukuran lebar retakan. Hal ini disebabkan karena *quadcopter* yang digunakan memiliki gaya angkat (*thrust*) sebesar 249 gram dan berat total komponen yang dipakai adalah 244 gram. Akibatnya gerakan *hover* yang tidak stabil membuat *quadcopter* mudah terantuk dan rentan terhadap kondisi angin. Solusi pengembangan yang dilakukan, berupa perancangan *quadcopter* kembali dan membuat sistem control. *Quadcopter* yang digunakan adalah *quadcopter* berjenis F450 bermaterial *polymide nylon* dengan campuran *glass fiber*. Dengan tingkat kekakuan mirip seperti logam, berbobot ringat dan murah/terjangkau. Sistem kontrol yang digunakan adalah pengendali PID yang terdiri dari nilai *proportional gain*, *integral gain* dan *derivative gain*. Hasil dari perancangan *quadcopter* yang didapat memiliki dimensi 360 x 360 x 200 mm, *wheelbase* 570 mm, dan *thrust* 2,9094 kg lebih besar dari total berat *quadcopter* yaitu 1,709 kg.

Kata kunci : pid; *quadcopter*; *thrust*; uav

Abstract

Its history UAV (Unmanned Aerial Vehicle) technology as an unmanned aerial vehicle was first initiated in the world of military technology. However, there are currently many innovations related to using UAVs as a tool in construction, agriculture, logistics, and others. In using UAVs, not everything is smooth, one of which is using a quadcopter type UAV (Type: DJI Mavix Mini II), which is used to detect cracks in concrete buildings. The use of the UAV still has problems related to control when hovering. The result is an error in measuring the width of the crack. This is because the quadcopter used has a thrust of 249 grams, and the total weight of the components used is 244 grams. As a result, the unstable hover movement makes the quadcopter easy to stumble and vulnerable to wind conditions. The development solution is in the form of redesigning the quadcopter and creating a control system. The quadcopter used is an F450 quadcopter with polyamide nylon mixed with glass fiber. With a level of rigidity similar to metal, lightweight, and cheap/affordable. The control system used is a PID controller consisting of proportional gain, integral gain, and derivative gain values. The results of the quadcopter design obtained have dimensions of 360 x 360 x 200 mm, a wheelbase of 570 mm, and a thrust of 2.9094 kg, more significant than the total weight of the quadcopter, 1.709 kg.

Keywords: pid; *quadcopter*; *thrust*; uav

1. Pendahuluan

UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) adalah sebuah pesawat tanpa pilot, dikendalikan dari darat atau dengan komputer dari pusat [1]. Dalam sejarahnya pertama kali diinisiasi dalam dunia teknologi militer [2]. UAV dapat digunakan dalam banyak skenario dan telah membentuk berbagai jenis [3]. Salah satunya UAV bertipe *rotary wing* yang terdapat dua jenis yaitu *single rotor* dan *multirotor (Multicopter)*. *Multirotor* sendiri dibedakan berdasarkan jumlah motornya, pada umumnya memiliki motor dengan jumlah mulai dari 3 (*Tricopter*), 4 (*Quadcopter*), 6 (*Hexacopter*), 8 (*Octocopter*) dan lainnya. *Multirotor* memiliki keunggulan dapat mengangkat beban lebih berat karena jumlah motor pada *multirotor* lebih banyak serta juga memiliki mobilitas dan fleksibilitas saat terbang. Oleh karena itu, berbagai inovasi terkait UAV sebagai alat bantu di dalam bidang konstruksi, pertanian, logistik, dan lain-lain sudah cukup banyak dilakukan. Salah satunya, penggunaan sistem UAV berjenis *quadcopter* sebagai identifikasi retak bangunan bermaterial beton secara *real time* yang

dikombinasikan dengan teknologi *image processing* berdasarkan implementasi segmentasi warna HSV (*Hue, Saturation, Value*). Dari hasil penelitian, rata-rata *error* pengukuran lebar retakan saat sistem UAV diterbangkan masih cukup tinggi. Hal ini terjadi akibat adanya *delay* antara pengukuran jarak dengan perhitungan lebar. Terlebih lagi pergerakan sistem UAV yang tidak stabil, membuat sistem tidak berfokus pada titik pengukuran. Hal ini juga disebabkan oleh ketidakstabilan pada UAV yang digunakan yaitu UAV berjenis *quadcopter* dengan tipe DJI Mini Mavic II. Karena *quadcopter* yang digunakan memiliki gaya angkat (*thrust*) sebesar 249 gram dan berat total komponen yang dipakai adalah 244 gram. Akibatnya *quadcopter* mudah terantuk dan rentan terhadap kondisi angin [4].

Pergerakan *quadcopter* dipengaruhi oleh variasi kecepatan dan rotasi dari *propeller* yang digerakkan oleh motor [5]. Sehingga mengubah beban torsi dan karakteristik gaya dorong/angkat yang dapat memampukan *quadcopter* bergerak naik turun sesuai sumbu z (*altitude*), gerakan kanan kiri sesuai sumbu x (*roll*), gerakan depan belakang sesuai sumbu y (*pitch*) dan gerakan berputar dari sumbu z (*yaw*) [6]. Sistem kontrol yang banyak digunakan adalah kontrol PID (*Propositional Integral Derivatif*) yang berfungsi untuk menghasilkan sinyal kendali berdasarkan perbedaan antara *set point* (nilai yang diinginkan) dan variabel proses (nilai aktual), dengan tujuan untuk mengatur variabel proses agar mencapai set-point. Dalam penggunaannya, setiap bagian dari kontroler PID dapat diatur dengan bobot yang berbeda-beda tergantung pada karakteristik sistem yang dikendalikan dan tujuan pengendalian yang ingin dicapai [7].

2. Material dan Metode Penelitian

2.1 *Quadcopter*

Quadcopter adalah sebuah jenis pesawat tanpa awak yang memiliki empat rotor yang digerakkan oleh motor listrik dengan masing-masing menggunakan baling-baling (*propeller*), satu pasang yang berputar searah jarum jam sementara yang lain berputar berlawanan arah jarum jam [6]. *Quadcopter* merupakan alat yang digunakan untuk dapat memperoleh data kestabilan berupa nilai *roll*, *pitch*, dan *yaw*. Sistem *quadcopter* terdiri atas: *frame*, *flight controller*, motor listrik, ESC (*Electronic Speed Controller*), *propeller*, *radio transmitter-reciver*, sensor, PDB (*Power Distribution Board*), dan *power supply* [8].



Gambar 1 Desain 3D *quadcopter*



Gambar 2 Bentuk fisik sistem *quadcopter*

Tabel 1 Spesifikasi sistem *quadcopter*

Spesifikasi hardware	
<i>Quadcopter</i>	Alat deteksi
<ul style="list-style-type: none"> • PIXHAWK PX4 2.4.8 • U-blox NEO-M8N • Turnigy 2830 900KV L2215J-900 <i>brushless motor</i> • ESC Turnigy AE-20A • SiK <i>telemetry radio</i> V3 • <i>Transmitter & receiver</i> (FS-i6) • <i>Power module</i> • <i>Li-po battery</i> 4200 mAh 35C • <i>Blade propeller</i> 1045 	<ul style="list-style-type: none"> • Raspberry Pi 4 model B • PING <i>ultrasonic distance sensor</i> • <i>Camera</i> Raspberry Pi V2 • <i>Portable lithium battery power pack supply</i> AP77 • <i>Copper heatsink</i> • <i>Mini fan</i>

Sistem alat deteksi retak terdiri atas: sensor ultrasonik, kamera digital, dan minikomputer. Sensor ultrasonik berfungsi untuk mengukur jarak kerja antara sistem *quadcopter* dengan permukaan kerja. Sensor yang digunakan adalah PING Parallax. Kamera digital berfungsi sebagai penangkap gambar. Kamera digital yang digunakan Raspberry Pi V2 *Camera*. Minikomputer yang digunakan Raspberry Pi 4 Model B [9]. Minikomputer berfungsi untuk mengolah data gambar dan jarak untuk memperoleh lebar dan arah [4]. Detail spesifikasi sistem *quadcopter* dapat dilihat pada Tabel 1, sedangkan desain 3D perancangan *quadcopter* ditunjukkan pada Gambar 1 dan bentuk fisik sistem *quadcopter* dilihat pada Gambar 2

2.2 Kalibrasi

Kalibrasi pada setiap komponen merupakan proses pengaturan ulang atau penyesuaian parameter atau karakteristik suatu komponen elektronika agar sesuai dengan standar atau spesifikasi yang telah ditentukan [10]. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa komponen tersebut dapat berfungsi dengan benar dan memberikan hasil yang akurat dan konsisten selama penggunaannya. Proses kalibrasi ini dilakukan untuk meminimalkan kesalahan pengukuran, mengoptimalkan

kinerja, dan meningkatkan kualitas pengukuran. Pada proses ini juga untuk menguji dan memverifikasi kinerja, keandalan, dan fungsionalitas suatu komponen elektronika. Agar memastikan bahwa komponen tersebut dapat berfungsi sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan, memenuhi standar kualitas, dan dapat diandalkan dalam pengaplikasiannya. Proses pengujian ini melibatkan penggunaan peralatan khusus seperti *oscilloscope*, *multimeter*, *power supply*, dan perangkat lunak pengujian. Selama proses pengujian, parameter seperti kekuatan sinyal, frekuensi, daya listrik, dan waktu *respons* diukur dan dianalisis untuk memastikan bahwa komponen elektronika dapat beroperasi dengan benar. Hal ini sangat penting dalam memastikan kualitas dan kehandalan, serta dapat membantu mengidentifikasi masalah atau kelemahan pada komponen. Proses pengujian ini juga memungkinkan untuk memperbaiki masalah dan meningkatkan kinerja sebelum dilakukan pengujian seutuhnya.

2.3 Pengujian Terbang dan Metode Pengambilan Data

Pengujian terbang dilakukan dengan menggunakan sebuah *software controller quadcopter* yaitu *mission planner* [11]. Pengamatan dilakukan dengan 2 metode, metode pertama yaitu percobaan dilakukan dengan menggunakan *Quadcopter Drone Test Bench* dan metode kedua dengan melakukan uji terbang secara langsung di area terbuka. Metode pertama bertujuan agar *quadcopter* setelah proses *assembly* selesai agar dapat memvalidasi hasil *set-up* dan mencegah kecelakan serta kerusakan *hardware*. Kemudian setelah selesai dapat dilakukan metode kedua. Metode kedua, pengamatan pergerakan *quadcopter* saat berjalan dilakukan secara mata telanjang serta pengambilan hasil data terbang dapat dilakukan dengan merekam pergerakan *throttle*, *pitch*, *yaw*, dan *roll* di dalam *monitor controller*. Pada metode kedua, opsi ke-1 dilakukan gerakan *hovering mode Alt-Hold* dengan mempertahankan ketinggian. Lalu pada opsi ke-2, dengan melakukan pergerakan otomatis menggunakan *mode Autotune* [11]. Pengujian terbang dilakukan berkelanjutan dengan perolehan hasil dari *turning* nilai PID, dilakukan berulang hingga memperoleh nilai PID dengan respon waktu terbaik.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Identifikasi Kebutuhan

Spesifikasi memberikan deskripsi yang tepat tentang apa yang harus dilakukan pada suatu produk yang merupakan terjemahan dari kebutuhan-kebutuhan ke dalam istilah teknis. Target spesifikasi ditentukan pada awal proses dan mewakili harapan perancangan, yang kemudian akan disempurnakan agar konsisten sesuai dengan kendala yang ada. Dalam proses penentuan dan penyempurnaan spesifikasi konsep, dilakukan dengan proses *front-end* [12].

Tabel 2 Hirarki kebutuhan dan nilai *relative importance*

No	Need Statement	Imp
1	Alatnya praktis dan mudah digunakan	5
2	Desain yang futuristic dan modern	3
3	Biaya pembuatan murah	4
4	Menggunakan daya yang kecil dan tahan lama	5
5	Ukuran tidak terlalu besar	3
6	Memiliki bobot yang ringan	4
7	Keseimbangan yang stabil saat terbang	5
8	Hasil pengambilan data memiliki resolusi yang tinggi, akurat, dan presisi.	5
9	Pengiriman data secara real time	5

Proses *front-end* umumnya mengandung banyak kegiatan yang saling terkait, karena jarang proses berjalan secara murni berurutan. Dalam praktiknya kegiatan ini mungkin tumpang tindih dalam waktu dan literasi pengembangan atau pengulangan kegiatan yang seringkali diperlukan. *Output*-nya nanti merupakan daftar spesifikasi target terdiri dari matriks, *marginal value* dan *ideal value* [12]. Langkah pertama yang dilakukan yaitu menentukan hirarki kebutuhan yang ditunjukkan pada Tabel 2. Penggunaan hirarki kebutuhan dilakukan untuk menentukan pernyataan kebutuhan mana yang di anggap penting dan memiliki andil besar dalam perancangan selanjutnya. Kemudian dilakukan penilaian *relative importance* pada kebutuhan digunakan untuk memprioritaskan *fitur* yang ada pada alat yang dikembangkan. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4 setelah menentukan hirarki kebutuhan, suatu uraian atau ketentuan-ketentuan yang disusun secara lengkap dan jelas mengenai suatu barang, metode atau hasil akhir pekerjaan yang dapat dibangun atau dikembangkan sedemikian rupa sehingga dapat memenuhi kebutuhan semua pihak yang terkait. Spesifikasi teknis haruslah memiliki ukuran atau satuan dan memiliki hubungan dengan hasil identifikasi kebutuhan.

Tabel 4 Spesifikasi teknis perancangan

No. Me-trix	No. Kebu-tuhan	Kebutuhan	Metrix	Imp	Unit	Marginal Value	Ideal Value
1	1, 7, 8	Target	Berhasilan dijalankan, stabil, akurat, presisi, praktis dan mudah	5	List	0 - 10	9

			digunakan.				
2	3		Biaya murah	4	Rp	< 5 Jt	4,2 Jt
3		Material Rangka	Berat	4	Kg	< 3	1,8
4	6		Jenis	4	-	Komposit Polymer	PLA
5		Dimensi Body	Panjang	3	mm	< 400	363
6	5		Lebar	3	mm	< 400	363
7			Tinggi	3	mm	< 53	70
8	6		Berat Total	4	kg	< 1	0,75
9		Ketahanan dan Kestabilan	Daya	4	mAh	> 2400	4200
10	4, 7		Lama Terbang	4	s	> 180	600
11			Getaran	5	m/s ²	< 200	100
12			Error	5	%	< 2	1
13		Data Hasil Pengujian	Resolusi	5	pixel	> 720	1080
14	8		Frame Rate	5	fps	>30	60
15			Akurasi dan Presisi	5		0 - 10	9
16	9	Waktu Pengiriman Data	Delay	5	s	< 5	1

3.2 Matriks Morfologi Sistem *Quadcopter*

Metode morfologi merupakan metode yang digunakan untuk menemukan alternatif dari konsep produk yang dibuat. Matriks morfologi menggunakan struktur fungsi untuk menemukan alternatif dari konsep produk yang telah dibuat.

Tabel 5 Matriks morfologi komponen sistem *quadcopter*

Sub-Fungsi	Sub Fungsi 1	Sub Fungsi 2	
Mengubah orientasi pengambilan Gambar di udara	<i>Quadcopter</i>	UAV F450	A.1
		DJI <i>Mavic Mini 2</i>	A.2
		<i>Fimi X8 Mini</i>	A.3
		SJRC F11 4K PRO	A.4
Akuisisi Data Jarak	Ultrasonik	HC-SR04	B.1
		HY-SRF 05	B.2
		<i>Ping Parallax</i>	B.3
Akuisisi Data Gambar	Kamera	<i>Raspberry Pi Camera 5MP</i>	C.1
		<i>Raspberry Pi Camera V2 8MP</i>	C.2
Mengolah Data Citra dan Jarak	<i>Mini Computer</i>	<i>Raspberry Pi Pico</i>	D.1
		<i>Raspberry Pi Zero W</i>	D.2
		<i>Raspberry Pi 4 Model B</i>	D.3
Pengendali UAV	<i>Device Flight Controller</i>	APM <i>Ardupilot 2.6</i>	E.1
		PIXHAWK PX 4 2.4.8	E.2
		<i>Flight Controller bawaan</i>	E.3
	<i>Software</i>	DJI <i>Fly</i>	F.1
		<i>Mission Planner</i>	F.2

Dari matriks morfologi yang dibuat di pada Tabel 5 maka ditentukanlah 5 alternatif konsep sebagai berikut:

Konsep 1 = A.1 + B.1 + C.2 + D.2 + E.1 + F.2

Konsep 2 = A.1 + B.3 + C.2 + D.3 + E.1 + F.2

Konsep 3 = A.1 + B.3 + C.2 + D.3 + E.2 + F.2

Konsep 4 = A.2 + B.1 + C.2 + D.2 + E.3 + F.1

Konsep 5 = A.2 + B.3 + C.2 + D.3 + E.3 + F.1

3.3 Pemilihan Konsep

Metode *Pugh* yang dikembangkan oleh Stuart Pugh pada tahun 1990 dapat digunakan untuk membantu dalam pengambilan keputusan berdasarkan kriteria yang telah ditetapkan.

Tabel 6 Matriks keputusan

No	Kriteria	Bobot	Konsep				
			1	2	3	4	5
1	Kemudahan Penggunaan	8	S	S	S	S	S
2	Kecepatan pengiriman dan pemrosesan data hasil pengamatan	10	S	+	+	S	+
3	Akurasi Sensor Jarak	10	-	S	S	-	S
4	Resolusi Kamera (Bukan Kamera UAV)	10	S	S	S	S	S
5	Berat	8	-	-	-	S	S
6	Daya Angkat	10	+	+	+	S	S
7	<i>Wind Resistance</i>	9	S	S	S	S	S
8	Konektivitas <i>Flight Controller</i> dengan <i>Hardware</i> lain	10	S	S	+	-	-
9	Daya ketahanan dan Jarak Terbang (<i>Range</i>)	8	S	S	S	+	+
10	Pengaturan Mode dan Laju Kecepatan Penerbangan	9	+	+	+	S	S
11	Fleksibilitas Modifikasi UAV	10	S	S	+	-	-
12	Biaya	7	+	S	S	-	-
Total +			3	3	5	1	2
Total S			7	8	6	7	6
Total -			2	1	1	4	4
Total bobot +			26	29	49	8	18
Total bobot -			-18	-8	-8	-37	-27
Total keseluruhan			8	21	41	-29	-9

Keterangan :

Better (+) = 1; Same (S) = 0; Worse (-) = -1

Pada metode ini, kriteria dan alternatif disusun dalam bentuk matriks yang dinamakan matriks keputusan (*decision matrix*). Bobot untuk setiap kriteria dapat sama atau dapat ditentukan nilainya berdasarkan tingkat kepentingan kriteria, namun sebaiknya setiap kriteria mempunyai bobot yang berlainan karena dalam kenyataannya seringkali tingkat kepentingan berbeda antar kriteria. Selanjutnya setiap alternatif dibandingkan dan dinilai terhadap suatu alternatif yang merupakan referensi berdasarkan kriteria seleksi yang telah ditentukan. Dengan adanya penilaian angka tersebut maka dapat dilakukan pemilihan konsep alternatif mana yang akan digunakan. Berikut merupakan hasil penilaian dalam matriks keputusan yang ditunjukkan pada Tabel 6 Berdasarkan matriks keputusan di atas maka disimpulkan konsep sistem UAV yang akan digunakan adalah konsep nomor 3, dengan nilai *value* 41 sehingga diharapkan mampu memenuhi kriteria – kriteria yang telah diberikan dalam penelitian yang akan dilakukan.

3.4 Spesifikasi Teknis

Pada tahap ini, hasil dari matriks keputusan yang telah ditentukan menggunakan metode *pugh* dikonversi menjadi spesifikasi akhir untuk produk yang akan di buat sebelum dilakukan proses perancangan dan pengujian. Spesifikasi tersebut dapat di tampilkan pada Tabel 7

Tabel 7 Spesifikasi teknis

Parameter	Besaran
<i>Quadcopter</i>	<i>Quadcopter</i> Tipe F450
<i>Mini Computer</i>	<i>Raspberry Pi</i> 4 Model B
Sensor	<i>PING Parallax</i>
Kamera	<i>Raspberry Pi Camera</i> V2 8MP
<i>Flight Controller</i>	PIXHAWK PX 4 2.4.8
<i>Software</i>	<i>Mision Planner</i>

3.5 Perancangan *Quadcopter*

Beberapa perubahan dan pengembangan bentuk *quadcopter* juga dilakukan berdasarkan hasil evaluasi pengujian, agar dapat mendapat bentuk yang optimal. Hal ini bersamaan dengan berjalannya proses pengujian untuk mencari kestabilan dari *quadcopter* yang dirancang [13]. Akhirnya didapatkan desain akhir pada perancangan kali ini dengan kestabilan yang paling optimal. Berikut hasil akhir bentuk perancangan yang telah dibuat dapat dilihat pada Gambar 1 dan 2. Sedangkan spesifikasi *quadcopter* yang telah dirancang dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8 Spesifikasi *quadcopter* hasil perancangan

Parameter	Besaran
<i>Dimensions</i>	360 x 360 x 200 mm
<i>Wheelbase</i>	570 mm
<i>Weight</i>	1,709 kg
<i>Battery life</i>	±10-12 menit
<i>Communication and control distance</i>	600 ~ 1200 m (<i>in the air</i>)
<i>Thrust</i>	2,9094 kg
<i>Waterproof ratings</i>	0 (<i>zero</i>) <i>no-protection</i>

4. Kesimpulan

Memperoleh spesifikasi dan bentuk *quadcopter* sebagai alat pendeteksi keretakan yang baik dan seimbang. Memiliki bentuk yang *compact* dan ideal, namun masih mudah untuk dapat dimodifikasi dan di *upgrade* untuk pengembangan selanjutnya. *Quadcopter* memiliki dimensi 360 x 360 x 200 mm, *wheelbase* 570 mm, dan *thrust* 2,9094 kg lebih besar dari total berat *quadcopter* yaitu 1,709 kg.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Oxford Learners Dictionaries, "UAV," www.oxfordlearnersdictionaries.com, Jul. 29, 2023.
- [2] P. Gerin. Fahlstrom and T. J. Gleason, *Introduction to UAV Systems*, vol. 1. Wiley, 2012.
- [3] Archives Cradle of Abiation Museum, "Aerial Torpedo," *Cradleofaviation*, 1918. https://www.cradleofaviation.org/history/exhibits/exhibit-galleries/world_war_i/curtiss_sperry_aerial_torpedo.html (accessed Jul. 18, 2022).
- [4] M. Palti Situmorang, I. Haryanto, and Munadi, "Implementasi Segmentasi Warna HSV (Hue Saturation Value) pada Sistem UAV (Unmanned Aerial Vehicle) untuk Identifikasi Retak pada Bangunan BermaterialBETON," Kota Semarang, 2021.
- [5] P. Gerin. Fahlstrom and T. J. Gleason, *Introduction to UAV Systems*, vol. 1. Wiley, 2012.
- [6] Victor Illushko, Emaid A. Abdul-Retha, Sonke Dierks, and Pascual Marques, *Automatic Control Systems*. Southport, United Kingdom: Marques Aviation Ltd, 2016.
- [7] Yosua Pramono, "Pengolah Citra Digital Foto Udara Tanaman Padi Menggunakan Multicopter dengan Software Matlab untuk Menentukan Tingkat Kesuburan Tanaman Secara Offline," Universitas Diponegoro, Semarang, 2016.
- [8] Heri MS, "Drone : Pengertian, Fungsi, Sejarah, Jenis, Komponen dan Cara Kerja," *Sariksa*, Apr. 23, 2021. <https://www.sariksa.com/2021/04/drone-pengertian-fungsi-sejarah-jenis.html> (accessed Jul. 18, 2022).
- [9] raspberrypi.com, "Raspberry Pi 4," raspberrypi.com, 2022. <https://assets.raspberrypi.com/static/raspberry-pi-4-labelled-f5e5dcdf6a34223235f83261fa42d1e8.png> (accessed Jul. 19, 2022).
- [10] Permenhub PM 90, *Pengendalian Pengoperasian Pesawat Udara Tanpa Awak di Ruang Udara yang Dilayani Indonesia*. 2015.
- [11] ardupilot.org, "Mission Planner Overview," ardupilot.org, 2022. <https://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-overview.html> (accessed Dec. 09, 2022).
- [12] Karl T. Ulrich, Steven D. Eppinger, and Maria C. Yang, *Product design and development*, 7th ed. McGraw-Hill Education, 2019.
- [13] Prabhudesai, "Building Quadcopter (Part 2)," *Explore - Learn*, Nov. 01, 2014. <https://xplorenlearn.wordpress.com/2014/11/01/my-first-quadcopter-assembling-part-2/> (accessed Jul. 18, 2022).