

# Development of Quadcopter Drone and IoT Module Technology in Geospatial-Based Air Emission Monitoring

Anindya Ananda Hapsari<sup>1\*</sup>, Devan Junesco Vresdian<sup>2</sup>, Brainvendra Widi Dionova<sup>3</sup>, Teddy Andreansyah<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Teknik Informatika, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Global Jakarta, Depok, 16412, Indonesia

<sup>2,3</sup> Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Global Jakarta, Depok, 16412, Indonesia

## Informasi Artikel

Diterima : 21 Januari 2025  
Revisi : 30 Januari 2025  
Publikasi : 20 Maret 2025

## Kata Kunci:

Drone  
UAV  
Monitoring  
Air Quality  
IoT

## ABSTRAK

Penelitian ini memperkenalkan sistem pemantauan kualitas udara berbasis drone yang inovatif, dilengkapi dengan sensor multi-parameter untuk mengukur suhu, kelembapan, konsentrasi CO<sub>2</sub>, dan PM<sub>2.5</sub> secara real-time. Perancangan sistem ini terintegrasi dengan Internet of Things (IoT), memungkinkan pengiriman data langsung ke perangkat pintar untuk akses instan dan analisis cepat. Sistem ini memberikan solusi praktis dalam memantau kualitas udara secara fleksibel, terutama di area yang sulit dijangkau oleh perangkat pemantauan konvensional. Melalui simulasi, ditemukan bahwa drone mampu beroperasi selama 4,8 hingga 14,77 menit dengan pengosongan baterai sebesar 80%, tergantung pada kondisi lingkungan. Hasil pengujian kalibrasi sensor menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi, meskipun variasi data dipengaruhi secara signifikan oleh perubahan suhu. Uji coba dan kalibrasi sistem dilakukan sebagai langkah awal untuk memastikan keandalan perangkat serta membuka peluang pengembangan aplikasi yang lebih luas, termasuk pemantauan kualitas udara di area perkotaan, industri, dan lingkungan alam. Keunggulan utama sistem ini terletak pada kemampuannya untuk memberikan data real-time dan fleksibilitas dalam pengumpulan data di berbagai lokasi. Namun, penelitian ini juga mengidentifikasi beberapa tantangan, seperti keterbatasan kapasitas baterai dan jangkauan komunikasi, yang menjadi fokus untuk pengembangan lebih lanjut. Potensi peningkatan sistem mencakup pengoptimalan kapasitas baterai, perluasan jangkauan komunikasi, dan pengembangan model prediksi untuk analisis kualitas udara yang lebih canggih. Dengan demikian, sistem ini menawarkan solusi yang menjanjikan untuk pemantauan kualitas udara yang lebih efektif dan efisien di masa depan.

## ABSTRACT

*This research introduces an innovative drone-based air quality monitoring system, equipped with multi-parameter sensors to measure temperature, humidity, CO<sub>2</sub> concentration, and PM<sub>2.5</sub> in real-time. The system is designed with integration to the Internet of Things (IoT), enabling direct data transmission to smart devices for instant access and quick analysis. This system provides a practical solution for monitoring air quality flexibly, especially in areas that are difficult to reach with conventional monitoring devices. Simulations showed that the drone can operate for 4.8 to 14.77 minutes with an 80% battery depletion, depending on environmental conditions. Calibration testing of the sensors showed high accuracy, although data variations were significantly affected by temperature changes. The system underwent trial and calibration as an initial step to ensure device reliability and open opportunities for broader application development, including air quality monitoring in urban areas, industrial zones, and natural environments. The main advantage of this system lies in its ability to provide real-time data and flexibility in data collection from various locations. However, the study also identified several challenges, such as battery capacity limitations and communication range, which will be the focus of further development. Potential improvements include optimizing battery capacity, expanding communication range, and developing predictive*

---

*models for more advanced air quality analysis. Therefore, this system offers a promising solution for more effective and efficient air quality monitoring in the future.*

---

*This is an open-access article under the [CC BY-SA](#) license*



---

**\*Penulis Koresponden**

Email: [aninananda@jgu.ac.id](mailto:aninananda@jgu.ac.id)

Cara sitasi IEEE::

A. A. Hapsari, D. J. Vresdian, B. W. Dionova, T. Andreansyah, "Development of Quadcopter Drone and IoT Module Technology in Geospatial-Based Air Emission Monitoring," *Journal of Artificial Intelligence and Software Engineering (J-AISE)*, vol. 5, no. 1, pp. 1-13, Maret 2025. doi:10.30811/jaise.v5i1.6300

---

## 1. PENDAHULUAN

Pemerintah telah melakukan usaha untuk mengatasi masalah pencemaran udara dengan menggunakan Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 22 Tahun 2021 serta regulasi yang dikeluarkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) melalui peraturan Nomor P.14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2020 yang menetapkan pedoman untuk Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU) [1]. Namun, implementasi kebijakan ini masih menghadapi tantangan, terutama dalam hal infrastruktur pemantauan. Keterbatasan sensor kualitas udara mengakibatkan presentasi informasi Indeks Kualitas Udara tidak mencapai tingkat optimal. Secara dasar, penempatan sensor Indeks Kualitas Udara dapat memberikan masukan berharga dalam pembuatan kebijakan untuk mengendalikan dan mengawasi kualitas udara di suatu daerah [2]. Sayangnya, jumlah sensor pemantau kualitas udara di Indonesia masih terbatas. Kurangnya alat sensor yang memadai di setiap kota membuat sulitnya mendapatkan data kualitas udara yang tepat dan akurat. Menurut sumber yang didapatkan, di kota besar seperti Jakarta hanya dilengkapi tujuh unit sensor. Padahal kebutuhan akan data yang komprehensif sangat mendesak. Permasalahan kualitas udara bukan hanya terjadi di Jakarta, namun juga menjadi masalah kota-kota besar di Indonesia. Untuk menghadirkan urgensi stasiun cuaca yang representatif di Indonesia, diperlukan kontribusi dari berbagai pihak, termasuk pemerhati pemantau kualitas udara, masyarakat, akademisi, para peneliti, dan pemerintah [3]. Tahun 2015-2022, KLHK telah membangun 56 Stasiun Pemantau Kualitas Udara Ambien (SPKUA) di 56 kabupaten/kota di Indonesia. Namun, situasi ini masih belum ideal, terutama mengingat tingginya tingkat paparan polutan di berbagai wilayah. KLHK mengungkapkan bahwa idealnya satu stasiun pemantau mampu mencakup wilayah dengan luas 5 hingga 11 kilometer persegi. sementara saat ini cakupannya masih jauh lebih luas. Dengan perkembangan teknologi, drone dan sensor kualitas udara berbiaya rendah yang dapat diintegrasikan dengan sistem semakin terjangkau dan tersedia, membuka peluang untuk memanfaatkan teknologi ini dalam mendukung pemantauan kualitas udara. Drone dapat meningkatkan resolusi spasial dan temporal data kualitas udara, terutama dengan memberikan wawasan tentang distribusi vertikal polutan, memfasilitasi pencarian, dan mendeteksi sumber emisi [4]. Selain itu, penggunaan drone dapat menjangkau area yang sulit diakses oleh stasiun pemantau konvensional. Karena permasalahan dan urgensi tersebut, tim peneliti ingin mengajukan proposal penelitian dalam pemantauan kualitas udara berbasis drone dengan menggunakan IoT. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi solusi inovatif untuk mengatasi keterbatasan sistem pemantauan udara konvensional dan memberikan data yang lebih akurat serta real-time untuk mendukung kebijakan pengendalian polusi udara di Indonesia. Pendahuluan ini memberikan tujuan yang berarti bagi naskah, yaitu untuk menyoroti pentingnya inovasi teknologi dalam mengatasi tantangan pemantauan kualitas udara, serta mendorong kolaborasi antara pemerintah, peneliti, dan masyarakat dalam menciptakan solusi yang berkelanjutan. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan akurasi dan cakupan pemantauan, tetapi juga mendukung upaya global dalam mengurangi dampak pencemaran udara terhadap kesehatan masyarakat dan lingkungan.

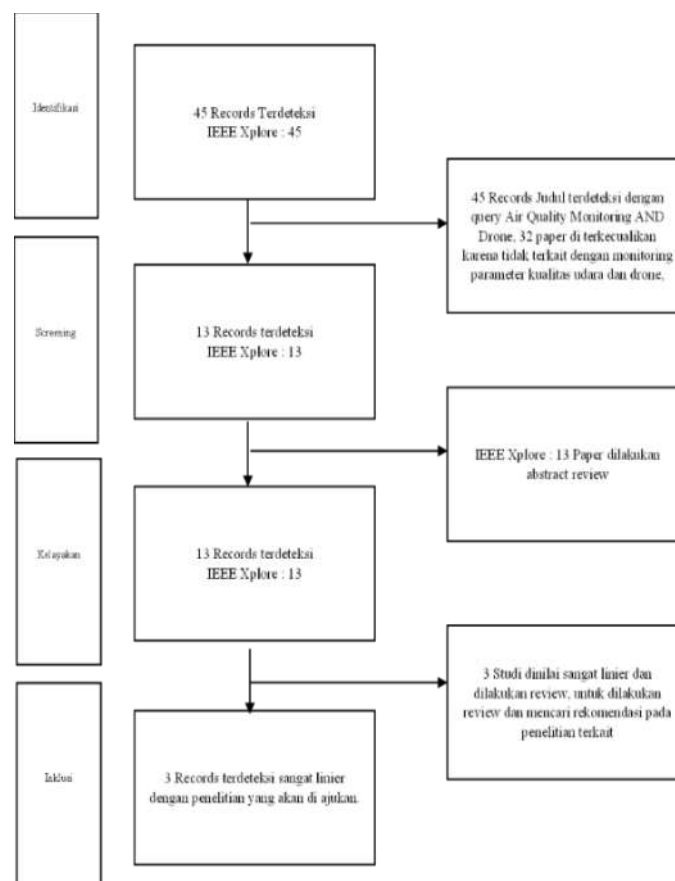
## 2. PENELITIAN TERKAIT

Pencarian sistematis dilakukan untuk mengidentifikasi pemecahan permasalahan dengan melakukan review artikel penelitian dari database untuk mencari rekomendasi penelitian terkait yang terjadi selama tahun

2020-2024. Pencarian pada database didasarkan pada query “*air quality monitoring AND drone*”. yang digunakan sebagai pendekatan pemecahan masalah untuk sistem yang akan di kembangkan.

Database yang dipilih memiliki latar belakang sains dan teknik, *library* yang dipilih adalah IEEE Xplore <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>, dengan hasil review sebagai berikut: terdapat 45 output berdasarkan search strategi yang telah di lakukan dan setelah dilakukan review pada judul dan abstrak terdapat 13 artikel terkait pada IEEE Xplore, kemudian dilakukan review dan mencari rekomendasi dari penelitian terkait. Setelah dilakukan review pada terdapat 3 penelitian paling terkait yang dapat diambil rekomendasi. Dimana perlunya menyediakan solusi yang fleksibel, andal, dan murah untuk pemantauan gas-gas tertentu di wilayah yang sulit di jangkau [5]. Dan rekomendasi untuk masa depan, beberapa perbaikan dapat dipertimbangkan, misalnya, implementasi transmisi data yang lebih baik [6].

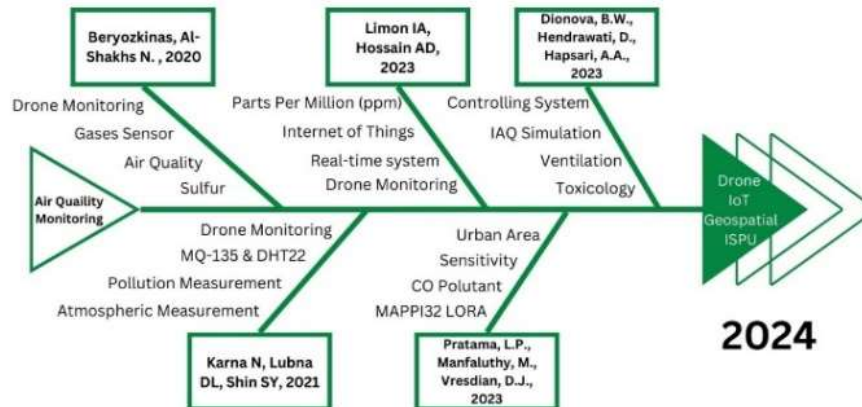
Pencarian sistematis dilakukan untuk mengidentifikasi pemecahan permasalahan dengan melakukan review artikel penelitian dari berbagai database terkemuka, seperti Scopus, IEEE Xplore, dan ScienceDirect, untuk mencari rekomendasi penelitian terkait yang terjadi selama tahun 2020-2024. Pencarian pada database didasarkan pada query “*air quality monitoring AND drone*”, yang difokuskan pada studi-studi yang membahas integrasi teknologi drone dengan sistem pemantauan kualitas udara. Metode ini digunakan sebagai pendekatan pemecahan masalah untuk sistem yang akan dikembangkan, dengan tujuan mengumpulkan data dan wawasan terkini tentang perkembangan teknologi, tantangan yang dihadapi, serta solusi inovatif yang telah diimplementasikan dalam penelitian sebelumnya. Selain itu, pencarian ini juga mencakup analisis terhadap studi kasus dan hasil eksperimen yang relevan untuk memahami efektivitas penggunaan drone dalam berbagai kondisi lingkungan, baik di area perkotaan, industri, maupun pedesaan. Hasil dari review literatur ini diharapkan dapat memberikan landasan teoritis dan praktis yang kuat untuk merancang sistem pemantauan kualitas udara berbasis drone yang lebih efisien, akurat, dan scalable.



Gambar 1 Review Rekomendasi Pendekatan Pemecahan Masalah

Dari kajian-kajian yang telah dikumpulkan melalui metode yang sistematis, dan pencarian penelitian terkait lainnya, kemudian akan dirangkum dan dianalisis. Sehingga dapat ditemukan state of art pada penelitian. Penelitian ini akan dilakukan dengan mengusung kebaruan dari perancangan drone dan pengembangan arsitektur rangkaian sistem node sensor kualitas udara dan kemudian dilakukan pengujian simulasi daya, beban dan pengambilan sampel data geospasial parameter emisi kualitas udara. Sebelumnya, penelitian terbaru

mengenai sistem monitoring kualitas udara dengan drone sudah di lakukan oleh beberapa peneliti lain dan masih terdapat peluang untuk pengembangan didapatkan dari rekomendasi penelitian terkait.

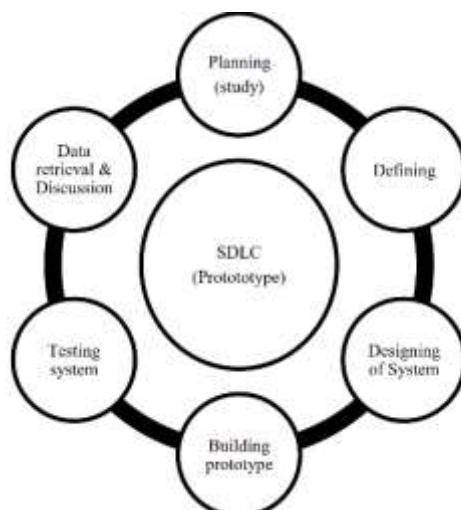


Gambar 2. *State of Art* dan pengembangan

Terdapat artikel *review* yang merekomendasikan tantangan dan peluang terkait sistem berbasis drone untuk penginderaan kualitas udara, terdapat tiga kategori *state-of-the-art* dalam pemantauan kualitas udara berbasis drone, meliputi tantangan teknologi dalam mengoperasikan, mengelola, dan memelihara drone dan interaksi antara sensor kualitas udara dan drone [4]. Penelitian serupa oleh [7] telah dilakukan namun pada penelitian ini belum digunakan Internet sebagai pengiriman data parameter kualitas udara. Terdapat juga penelitian terkait lainnya dimana penelitian ini menggunakan internet dalam pengiriman data, namun belum dijelaskan analisa daya angkut drone dan pengujian pengambilan data tidak dilengkapi data geospasial dan tingkat ketinggian yang berbeda, pengujian hanya dilakukan pada ketinggian 3 meter [8]. Implementasi lainnya juga di lakukan oleh [9] namun pada penelitian ini belum adanya sensor pendeteksi PM 2.5. Karena hal itulah dalam penelitian ini dirancang pengembangan sistem dengan penambahan modul sensor berbasis IoT, juga akan dilakukan metode pengujian simulasi daya angkut dan daya tahan drone untuk pengambilan sampel data parameter emisi udara dan data geospasial. Tim peneliti telah melakukan penelitian terkait sistem monitoring kualitas udara sejak 2018 dengan diawali dengan review pengembangan low cost sistem monitoring kualitas udara di dalam ruangan [10], sampai implementasi sistem untuk monitoring emisi dalam ruangan, dan di kembangkan dengan implementasi pengujian pada lingkungan dengan menambah node sensor [11], dan pengembangan aplikasi dengan web oleh [12], kemudian terdapat desain dan simulasi dengan sistem kontrol diuji coba pada penelitian [13], dan tim peneliti mencoba mengembangkan untuk implementasi pemantauan sistem pada luar ruangan dengan updating pada modul pengiriman data dengan uji coba pada daerah resident [14], kemudian pada penelitian ini adalah berfokus untuk perancangan pengembangan dan simulasi integrasi sistem monitoring kualitas udara dengan drone untuk pengambilan data parameter emisi *geospasial* polutan di udara seperti gas CO, CO<sub>2</sub>, debu *Particulate Matter* (PM).

### 3. METODE DAN DESAIN SISTEM

Metode penelitian pada perancangan sistem ini menggunakan metode model SDLC (*System Development Life Cycle*). Model ini digunakan sebagai panduan dalam proses penelitian. Dimulai dengan investigasi, kemudian studi dan penelusuran literatur, dan dilanjutkan dengan pengembangan desain sistem, membangun sistem dengan program dan pengujian, implementasi perangkat keras dan perangkat lunak aplikasi, pengumpulan data, pembahasan verifikasi dan analisis data. Diinisiasi dari memulai proses perencanaan dengan melakukan investigasi dan penelusuran dari penelitian sebelumnya yang telah di kembangkan, kemudian merancang dan mengembangkan penelitian berdasarkan tantangan penelitian sebelumnya yang ada dan direkomendasikan dengan merancang sistem, kalibrasi sistem atau pengujian training, dan pengolahan data yang ada.



Gambar 3. Metode SDLC

Metode SDLC (*Software Development Life Cycle*) digunakan dalam penelitian ini sesuai dengan gambar di atas. Proses pertama adalah membuat perencanaan dan mengidentifikasi tantangan utama di bidang IoT dan monitoring kualitas udara dengan drone. Mendefinisikan karya terkait dan studi sebelumnya yang dapat dikembangkan. Pada tahap ini diketahui apa yang dapat dilakukan dan dikembangkan berdasarkan penelitian sebelumnya, dengan mempertimbangkan rekomendasi dari studi-studi yang telah dilakukan. Tahap perencanaan ini juga mencakup analisis kebutuhan sistem, termasuk parameter kualitas udara yang akan diukur, seperti konsentrasi CO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>, suhu, dan kelembapan, serta menentukan spesifikasi teknis drone dan sensor yang akan digunakan.

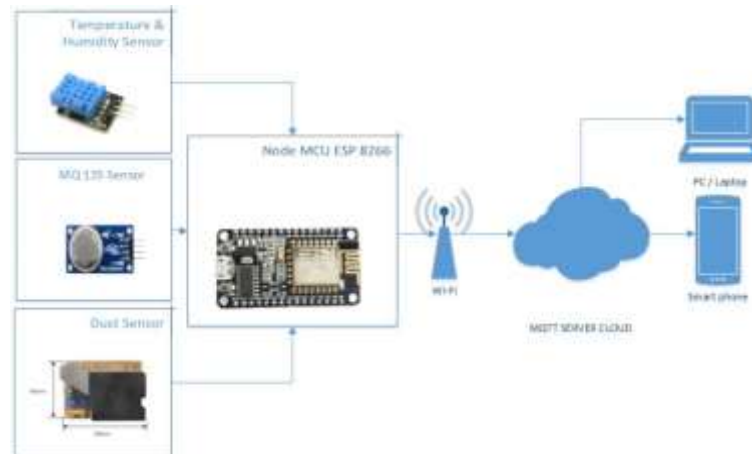
Selanjutnya, merancang dan mengusulkan sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT dengan teknologi drone. Tahap ini melibatkan pembuatan desain sistem secara detail, termasuk arsitektur perangkat keras dan perangkat lunak, integrasi antara sensor, drone, dan platform IoT, serta pemilihan protokol komunikasi yang sesuai untuk transmisi data real-time. Desain ini harus memastikan bahwa sistem dapat beroperasi secara efisien, akurat, dan mampu mengatasi tantangan lingkungan seperti interferensi sinyal dan kondisi cuaca yang berubah-ubah.

Setelah desain selesai, tahap berikutnya adalah membangun dan mengimplementasikan desain prototipe sensor node untuk pemantauan kualitas udara dan mengintegrasikannya dengan *Quadcopter*. Pada tahap ini, komponen-komponen seperti sensor MQ135 (untuk mendeteksi gas), DSM501a (untuk partikulat), dan DHT11 (untuk suhu dan kelembapan) dipasang dan diuji secara terpisah sebelum diintegrasikan ke dalam sistem drone. Proses integrasi melibatkan pemrograman mikrokontroler dan pengujian awal untuk memastikan semua komponen bekerja sesuai dengan fungsinya.

Tahap selanjutnya adalah menguji perangkat keras dan perangkat lunak sistem yang dibuat. Pengujian ini mencakup uji simulasi beban pada drone untuk memastikan kemampuannya dalam membawa sensor dan perangkat tambahan, serta uji kinerja sensor dalam berbagai kondisi lingkungan. Data yang direkam dari sensor MQ135, DSM501a, dan DHT11 dikumpulkan dan dianalisis untuk mengevaluasi akurasi dan keandalan sistem. Pengujian juga melibatkan kalibrasi sensor dengan menggunakan datasheet sebagai referensi untuk memastikan bahwa data yang dihasilkan sesuai dengan standar yang ditetapkan.

Pada penelitian ini, dikembangkan embedded sistem sensor pendeteksi emisi udara yang akan dikombinasikan dengan sistem drone. Sebelum integrasi penuh, masing-masing sistem dilakukan uji simulasi dan kalibrasi terlebih dahulu. Pengambilan data pertama dari pengujian node sensor dilakukan untuk menentukan keandalan sistem. Proses ini melibatkan menyalakan node sensor dan melakukan pengambilan data awal, yang kemudian dibandingkan dengan nilai referensi dari datasheet untuk memastikan akurasi. Hasil dari pengujian ini akan menjadi dasar untuk perbaikan dan optimasi sistem sebelum diimplementasikan secara luas.

Dengan mengikuti metode SDLC, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan sistem pemantauan kualitas udara yang efektif, akurat, dan mampu memberikan data real-time untuk mendukung upaya pengendalian polusi udara. Selain itu, pendekatan sistematis ini memastikan bahwa setiap tahap pengembangan dilakukan dengan cermat, sehingga mengurangi risiko kegagalan dan meningkatkan kualitas hasil akhir.



Gambar 4. Desain Arsitektur Node Sensor Kualitas Udara

Selain desain node sensor, peneliti juga harus mendesain komponen sistem drone terlebih dahulu untuk dikombinasikan dengan node sensor pendeteksi emisi udara. Desain ini mencakup pemilihan frame, motor, propeller, baterai, dan sistem kontrol penerbangan yang sesuai, dengan mempertimbangkan faktor seperti daya angkat, stabilitas, dan efisiensi energi. Frame harus ringan namun kuat, motor dan propeller harus mampu membawa beban sensor tanpa mengorbankan kinerja, dan baterai harus mendukung durasi penerbangan optimal. Sistem kontrol penerbangan perlu memastikan navigasi yang akurat dan stabil, terutama saat mengumpulkan data dalam berbagai kondisi. Integrasi antara drone dan sensor harus dilakukan dengan hati-hati untuk menjaga keseimbangan dan kinerja drone. Pengujian awal, seperti uji stabilitas dan daya angkat, diperlukan sebelum sensor dipasang. Spesifikasi lengkap drone, termasuk dimensi, berat, dan kemampuan teknis, dapat dilihat pada gambar dan tabel yang disertakan, memberikan gambaran jelas tentang kapabilitas sistem yang dikembangkan untuk pemantauan kualitas udara yang efektif.



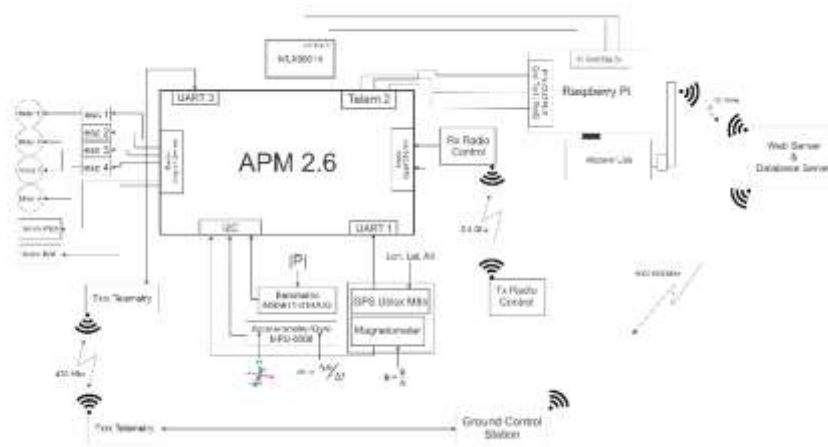
Gambar 5. Rancangan Desain Drone

Tabel 1. Rencana Spesifikasi Drone Quadcopter

Drone Type	<i>Quadcopter</i>
Frame	Tarot Iron Man 650 TL65B01 650 mm (25.59")
Material	Carbon Fiber
Motors	Sunnysky Brushless DC Motor V2841 700 kV 3.2/37
Propeller	14" x 4" Carbon Fiber
Battery	Li-Po 16000 mAh – 25/35 C
Controller	Hobbyking 30 A, Burst 40 A
Radio Transmitter	Flysky i6s
Radio Receiver	Flysky FS iA10B
Model Weight	3500 gram (incl. Drive)
Motor Weight	535 gram

Drone yang digunakan dalam penelitian ini merupakan tipe quadcopter dengan frame Tarot Iron Man 650 TL65B01 berukuran 650 mm (25.59") yang terbuat dari material carbon fiber, memberikan kekuatan dan ringan untuk mendukung stabilitas selama penerbangan. Drone ini dilengkapi dengan empat motor Sunnysky Brushless DC Motor V2841 700 kV 3.2/37 yang efisien dan bertenaga, serta propeller carbon fiber berukuran 14" x 4" untuk menghasilkan daya angkat yang optimal. Sebagai sumber daya, drone menggunakan baterai Li-Po 16000 mAh dengan rating 25/35 C, memastikan durasi penerbangan yang cukup lama untuk operasi pemantauan. Sistem kontrolnya terdiri dari Hobbyking 30 A (burst 40 A) sebagai electronic speed controller

(ESC), sementara komunikasi antara drone dan operator diatur melalui radio transmitter Flysky i6s dan radio receiver Flysky FS iA10B. Berat total drone, termasuk sistem penggerak, adalah 3500 gram, dengan berat motor masing-masing mencapai 535 gram. Spesifikasi ini dirancang untuk memastikan drone mampu membawa beban tambahan seperti sensor kualitas udara sambil tetap menjaga kestabilan dan efisiensi selama operasi.



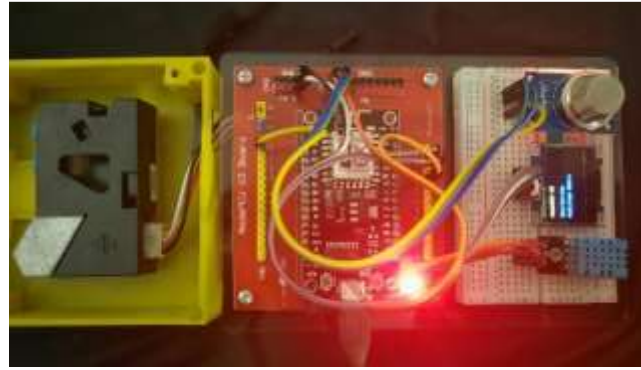
Gambar 6. Blok Diagram

Blok diagram pada Gambar 6 menunjukkan sistem quadcopter yang menggunakan *Flight Controller* APM (ArduPilot Mega) sebagai pengendali utama. APM dilengkapi dengan berbagai sensor yang memungkinkan drone beroperasi secara stabil dan akurat. Salah satunya adalah sensor MLX90614ESF, yang digunakan untuk mengukur suhu tanpa kontak, mirip dengan kamera thermal, sehingga memungkinkan deteksi suhu dari jarak jauh. Selain itu, terdapat gyro yang berfungsi untuk menjaga orientasi drone berdasarkan momentum sudut, serta accelerometer yang mengukur percepatan dinamis dan statis untuk memastikan keseimbangan selama penerbangan. Sensor barometer juga terintegrasi untuk mendeteksi perubahan tekanan udara, yang membantu dalam menjaga ketinggian drone secara otomatis. Sensor magnetometer, yang bekerja berdasarkan prinsip Hall Effect, berperan sebagai kompas digital untuk menentukan arah, sementara GPS receiver membantu dalam menentukan koordinat lokasi dan mempertahankan posisi quadcopter dengan bantuan panduan satelit. Komunikasi data antara drone dan ground control station dilakukan melalui link telemetry 433 MHz, yang memungkinkan pengiriman data sensor drone secara real-time dan penerimaan perintah dari operator. Selain itu, modul Internet Node MCU ESP8266 digunakan untuk mengirim data dari node sensor kualitas udara ke server database. Data ini dapat diakses melalui browser web atau aplikasi Android menggunakan koneksi internet, memungkinkan pemantauan jarak jauh dan analisis data yang lebih fleksibel.

Dengan kemampuan pemetaan geografis, drone direncanakan dapat mengumpulkan data yang mencakup informasi lokasi di permukaan bumi, memungkinkan pemetaan objek, peristiwa, dan fenomena dunia nyata ke area geografis tertentu yang diidentifikasi menggunakan koordinat GPS. Hal ini memungkinkan pengukuran yang tepat terhadap kadar partikel di udara, seperti PM2.5 dan gas polutan, serta memetakan distribusi polusi udara di suatu wilayah. Dengan demikian, drone tidak hanya menjadi alat pemantauan kualitas udara, tetapi juga alat analisis spasial yang dapat memberikan wawasan mendalam tentang kondisi lingkungan dan membantu dalam pengambilan keputusan yang lebih baik untuk pengendalian polusi udara. Kombinasi teknologi sensor, kontrol penerbangan, dan komunikasi data ini menjadikan sistem *quadcopter* ini sebagai solusi yang efektif dan inovatif untuk pemantauan lingkungan secara real-time.

#### 4. HASIL & ANALISA

Hasil dari desain untuk drone dan node sensor sebelum diimplementasikan dalam bentuk prototype dilakukan uji simulasi. Untuk hasil prototype node sensor dan drone dapat di lihat pada Gambar 7-8. Untuk drone dilakukan simulasi pengujian analisa waktu terbang dan uji berat angkut terlebih dahulu. Berdasarkan spesifikasi yang dirancang pada Tabel 1, hasil simulasi yang dihasilkan mendapatkan hasil yang cukup baik.



Gambar 7. Hasil Prototype Node Sensor



Gambar 8. Hasil Prototype Drone

Namun tentu saja, ada beberapa area yang dijadikan acuan untuk menilai apakah desain yang dibuat cukup tepat. Sementara itu, area yang digunakan sebagai acuan penilaian adalah beban, waktu penerbangan hover, daya listrik, estimasi suhu pada motor, dan perbandingan antara daya dorong dan berat. Hasil dari simulasi untuk sistem drone dapat dilihat pada gambar 9. Beban baterai adalah 9,91 C dengan tegangan terkait 11,1V dan kapasitas total 16.000 mAh. Baterai LiPo terdiri dari sel-sel berbentuk persegi panjang yang saling terhubung untuk membentuk satu unit baterai. Setiap sel memiliki tegangan 3,7 volt. Ketika beberapa sel dihubungkan secara seri, tegangan totalnya bertambah sesuai jumlah sel. Sebagai contoh, baterai dengan konfigurasi 3s memiliki tegangan  $3 \times 3,7 = 11,1$  volt. Kapasitas baterai, yang menunjukkan jumlah energi yang dapat disimpan, dinyatakan dalam satuan milliampere-jam (mAh).



Gambar 9. Hasil konfigurasi simulasi dari desain Drone

Untuk menjaga kondisi kesehatan baterai maka diberikan kondisi discharge pada presentase 80% sehingga kapasitas baterai yang dapat digunakan hanya sebesar 12.800 mAh. Jika berdasarkan datasheet dari Sunnysky V2814-11 KV700 penggunaan baterai 11,1 V yang ditambah dengan penggunaan propeller yang berukuran 14x4.7 inch, dapat menghasilkan gaya angkat (thrust) antara 600 – 1420 untuk masing-masing drive (penggerak).

SunnySky V2814-11 KV700 Brushless Motor Test Data									
Voltage (V)	Propeller (inch)	Throttle	Current (A)	Thrust (g)	RPM	Power (W)	Efficiency (μ/w)	Temperature* (°C) (°F)	
11.1 (3S)	APC 11x4.7	50%	2.9	400	3885	32	12.4	48	118
		65%	4.8	560	4565	53	10.5		
		75%	7.6	740	5220	84	8.8		
		85%	11	940	5800	122	7.7		
	100%	14	1080	6240	155	6.9			
	APC 12x3.8	50%	3.6	530	3770	40	13.3	50	122
		65%	5.8	670	4300	64	10.4		
		75%	10	920	4980	111	8.3		
		85%	12.7	1030	5260	141	7.3		
	100%	17	1230	5680	189	6.5			
	APC 13x4	50%	2.7	410	3980	30	13.7	47	117
		65%	4.2	520	4637	47	11.2		
		75%	6.7	740	5425	74	10.0		
		85%	9.3	910	6025	103	8.8		
	100%	12.1	1100	6575	134	8.2			
	APC 14x4.7	50%	4.7	600	3210	52	11.5	60	140
65%		7.8	800	3690	87	9.2			
75%		13	1090	4225	144	7.6			
85%		16.8	1260	4510	186	6.7			
100%	21.5	1420	4835	239	6.0				

Gambar 10. Brushless Motor Test Data

Jika beban keseluruhan (termasuk penggerak) sebesar 3500 gram, maka beban yang harus ditanggung pada masing-masing penggerak sebesar:

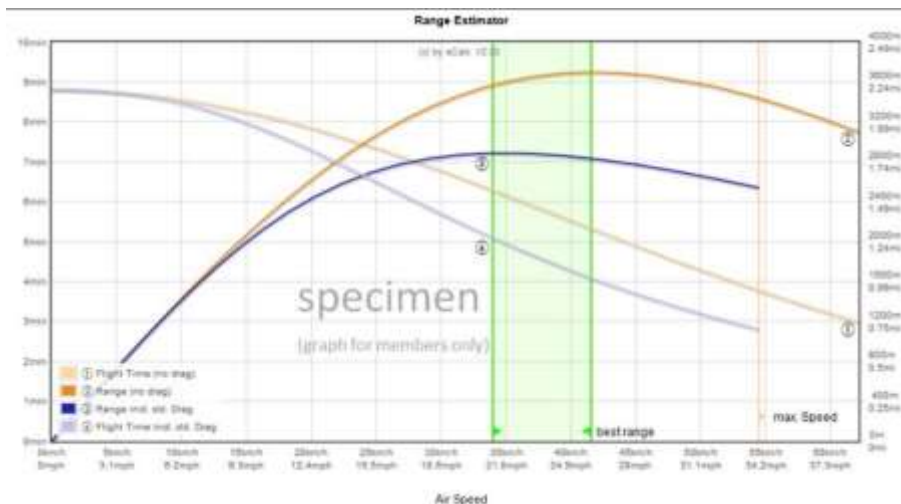
$$Motor @ Drive Weight = \frac{3500 \text{ gram}}{4} = 850 \text{ g}$$

Untuk dapat mencapai kondisi hover, diperlukan throttle sebesar 75% dan telah menghasilkan perbandingan antara thrust-weight sebesar 1:1.2. Dengan nilai arus sebesar 13 A dalam pengkondisian discharge baterai 80%, maka lama waktu drone dapat masuk dalam kondisi hover diperoleh lama waktu sebagai berikut:

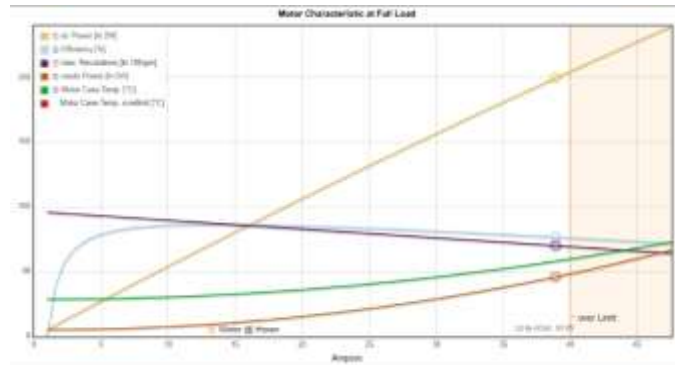
$$Lama waktu = \frac{12,8 Ah}{13 \times 4} (60) = 14,77 \text{ menit}$$

Berbeda dengan kondisi pada saat throttle 100% dengan controller pada posisi burst dengan masing-masing penggerak mempunyai nilai arus 40 A, kondisi minimum drone dapat terbang hanya selama 4,8 menit saja dengan perhitungan sebagai berikut:

$$Lama waktu (burst) = \frac{12,8 Ah}{40 \times 4} (60) = 4,8 \text{ menit}$$



Gambar 11. Penaksir Jangkauan Desain Drone



Gambar 12. Karakteristik Motor pada Kecepatan Penuh dari Desain Drone

Hasil simulasi menunjukkan bahwa drone ini memiliki performa yang cukup baik, namun masih terdapat ruang untuk peningkatan efisiensi. Dengan penggunaan kapasitas baterai sebesar 80%, drone dapat melayang selama 4,8 hingga 14,77 menit, tergantung pada *throttle* yang digunakan, seperti terlihat pada Gambar 12. Perlu diingat bahwa simulasi ini dilakukan dengan mempertimbangkan suhu motor sekitar 31 derajat Celsius dan kondisi lingkungan yang stabil. Meskipun hasil ini menunjukkan kemampuan drone dalam operasi jangka pendek, durasi penerbangan yang lebih lama dapat dicapai dengan mengoptimalkan konsumsi daya dan meningkatkan kapasitas baterai. Selain itu, faktor eksternal seperti angin, kelembapan, dan suhu lingkungan juga dapat memengaruhi performa drone, sehingga perlu dilakukan pengujian lebih lanjut dalam berbagai kondisi. Untuk mengevaluasi kinerja node sensor suhu dan kelembapan, dilakukan pengujian di ruang uji berukuran 4x4 meter. Ruang uji ini dirancang untuk menciptakan kondisi lingkungan yang terkontrol, memungkinkan peneliti untuk mengukur akurasi dan responsivitas sensor dalam berbagai skenario. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor suhu dan kelembapan mampu memberikan pembacaan yang konsisten dan akurat, dengan deviasi minimal dari nilai referensi. Namun, untuk memastikan keandalan sensor dalam kondisi nyata, perlu dilakukan uji lapangan di lingkungan yang lebih dinamis, seperti area perkotaan atau industri, di mana fluktuasi suhu dan kelembapan dapat lebih ekstrem.

Selain itu, pengujian juga dilakukan untuk memverifikasi integrasi antara node sensor dan sistem drone. Hasilnya menunjukkan bahwa data dari sensor dapat dikirimkan secara real-time ke ground control station melalui modul *telemetry* dan Node MCU ESP8266 tanpa gangguan yang signifikan. Hal ini membuktikan bahwa sistem komunikasi yang dirancang mampu mendukung operasi pemantauan kualitas udara secara efektif. Namun, untuk meningkatkan keandalan sistem, perlu dilakukan optimasi pada protokol komunikasi dan penambahan fitur redundansi untuk mengatasi potensi kehilangan data dalam kondisi sinyal yang tidak stabil.



Gambar 13. Aplikasi Monitoring Kualitas udara dengan MQTT pada Android

Dengan demikian, meskipun hasil simulasi dan pengujian awal menunjukkan potensi yang baik, masih diperlukan peningkatan dan pengujian lebih lanjut untuk memastikan bahwa sistem ini dapat beroperasi secara optimal dalam berbagai kondisi lingkungan. Langkah-langkah ini akan membantu mencapai tujuan penelitian, yaitu menciptakan sistem pemantauan kualitas udara berbasis drone yang akurat, efisien, dan dapat diandalkan.

Data suhu dan kelembaban dikumpulkan secara berkala dengan metode pengambilan sampel acak. Selanjutnya, analisis korelasi dilakukan untuk mengidentifikasi hubungan antara suhu dengan variabel lingkungan lainnya. Hasil korelasi antara data suhu dengan variabel lain seperti kelembaban, ppm, dan nilai partikel yang diperoleh pada Tabel 2.

Tabel 2. Korelasi suhu dengan kelembaban, ppm, dan PM

		Correlations			
		Temp	Humidity	ppm	pm
Temperature	Correlation Coefficient	1,000	,630**	,791**	,648**
	Sig. (2-tailed)		,000	,000	,000
	N	360	360	360	350
Humidity	Correlation Coefficient	,630**	1,000	,600**	,482**
	Sig. (2-tailed)	,000	.	,000	,000
	N	360	360	360	360
Ppm	Correlation Coefficient	,791**	,600**	1,000	,528**
	Sig. (2-tailed)	,000	,000	.	,000
	N	360	360	360	360
Pm	Correlation Coefficient	,649**	,471**	,527**	1,000
	Sig. (2-tailed)	,000	,000	,000	.
	N	360	360	360	360

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Setelah ditemukan adanya korelasi yang kuat antara suhu dengan variabel lainnya melalui uji Spearman rho, analisis dilanjutkan dengan regresi untuk mengkuantifikasi kekuatan hubungan tersebut. Model regresi yang dihasilkan untuk masing-masing variabel ditampilkan pada Tabel 3 sampai dengan Tabel 4.

Tabel 3. Ringkasan regresi suhu dengan kelembaban

Model Summary				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,460 <sup>a</sup>	,211	,209	3,06897

a. Predictors: temperature

Tabel 3 dan 4 menunjukkan hasil analisis regresi suhu dan kelembaban, untuk mengetahui pengaruh suhu terhadap kelembaban. Juga menunjukkan nilai yang signifikan dari perbandingan kedua variabel tersebut. Berdasarkan teori yang ada, jika hasil nilai signifikan lebih kecil dari 0,05 menunjukkan bahwa variabel independen yang digunakan dapat berpengaruh signifikan pada variabel dependen.

Tabel 4. Nilai koefisien regresi suhu dengan kelembaban

Coefficients <sup>a</sup>					
Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients Beta	t	Sig.
	B	Std. Error			
Temperature	30,976	2,997		10,337	000
	1,197	,122	,460	9,789	000

a. Dependent Variable: humidity

Tabel 3 dan 4 adalah hasil untuk suhu dan nilai kualitas udara CO<sub>2</sub>. Berdasarkan tabel, data nilai R (korelasi) menunjukkan besarnya hubungan secara umum antar variabel, nilai R kuadrat juga menunjukkan nilai korelasi antara variabel prediktor dengan variabel respons.

Tabel 5. Ringkasan model regresi antara suhu dengan ppm

Model Summary				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,761 <sup>a</sup>	,579	,577	109,61223
a. Predictors: temperature				

Tabel 6. Nilai koefisien regresi antara suhu dengan ppm

Coefficients <sup>a</sup>					
Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
	-1466,556	107,025		-13,703	,000
Temperature	96,857	4,369	,761	22,169	,000
a. Dependent Variable: ppm					

Tabel 5 dan 6 menunjukkan hasil hubungan suhu dengan partikulat berdasarkan data pengujian. Diasumsikan analisis dengan tingkat signifikansi 5% menunjukkan bahwa suhu memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kelembaban, konsentrasi CO<sub>2</sub>, dan kadar partikulat.

Tabel 7. Ringkasan model regresi antara suhu dengan partikulat

Model Summary				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,581 <sup>a</sup>	,337	,335	,33795
a. Predictors: temperature				

Tabel 8. Nilai koefisien regresi antara suhu dengan partikulat

Coefficients <sup>a</sup>					
Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
	-2,433	,330		-7,374	,000
Temperature	,182	,013	,581	13,494	,000
a. Dependent Variable: pm					

Suhu berkontribusi sebesar 20%, 58%, dan 34% terhadap variasi masing-masing variabel. Hasil ini mengindikasikan bahwa suhu merupakan faktor penting yang perlu diperhatikan dalam memahami perubahan pada variabel-variabel lingkungan tersebut. Sedangkan nilai sisanya dapat dipengaruhi oleh hal lain. Berdasarkan hasil pengujian dengan data yang didapatkan oleh node sensor didapatkan data yang signifikan dan uji kalibrasi dari sensor menunjukkan data yang baik dan sesuai dataset sehingga dapat diandalkan. Berdasarkan kalibrasi dan hasil pengujian yang dilakukan, node sensor dapat di gunakan dan kemudian dikombinasikan untuk pengambilan data sampel emisi udara dan di gabungkan bersama sistem drone.

## 5. KESIMPULAN

Drone dengan penambahan sensor monitoring kualitas udara telah berhasil di rancang dan di lakukan simulasi pengujian pada drone, dan kalibrasi dan uji pengambilan data node sensor. Hasil simulasi untuk drone menunjukkan bahwa kapasitas baterai, kecepatan terbang, dan beban yang diangkut merupakan faktor krusial dalam perancangan drone. Kendati demikian, efisiensi tinggi ini tidak serta-merta menjamin waktu terbang yang lama, terutama disebabkan oleh keterbatasan kapasitas baterai dan upaya untuk menjaga umur baterai dengan membatasi kedalaman pengosongan hingga 80%. Sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT yang telah dikembangkan berhasil diimplementasikan dalam prototipe. Sebelum dilakukan uji terbang, telah dilakukan serangkaian pengujian dan kalibrasi terhadap sensor untuk memastikan akurasi data yang diperoleh. Selain itu, simulasi beban pada drone juga dilakukan untuk mengevaluasi kinerja baterai dan komponen elektronik lainnya dalam kondisi operasional. Hasil simulasi menunjukkan bahwa drone mampu beroperasi

selama rata-rata 4,8-14,77 menit dengan beban penuh, dengan sisa daya baterai sekitar 20%. Waktu terbang ini dihitung berdasarkan berbagai kondisi penerbangan, termasuk hover, terbang stabil, dan manuver kompleks. Analisis lebih lanjut terhadap data kalibrasi sensor menunjukkan bahwa parameter suhu memiliki kontribusi yang signifikan terhadap variasi data yang diperoleh. Hal ini mengindikasikan bahwa sensor suhu berfungsi dengan baik dan dapat diandalkan. Begitu pula dengan sensor lainnya yang juga telah di uji dengan dataset dan menghasilkan data yang reliabel. Hasil penelitian ini membuka peluang untuk pemantauan kualitas udara yang lebih efektif dan efisien, terutama di daerah yang sulit dijangkau oleh peralatan monitoring konvensional. Drone yang dikembangkan dalam penelitian ini memiliki potensi besar untuk diaplikasikan dalam berbagai bidang, seperti pemantauan kualitas udara perkotaan, identifikasi sumber pencemaran, dan penelitian iklim mikro. Dengan pengembangan lebih lanjut, sistem ini dapat dilengkapi dengan fitur-fitur tambahan, seperti perencanaan rute penerbangan otomatis dan integrasi dengan sistem informasi geografis (GIS).

## 6. REKOMENDASI

Node sensor dan drone dapat di uji coba lebih lanjut untuk pengujian untuk mengetahui korelasi ketinggian dengan partikulat dan ppm atau emisi udara. Ke depannya, penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan meningkatkan kapasitas baterai dengan uji coba dan implementasi langsung atau simulasi dengan variabel yang berbeda, memperluas jangkauan komunikasi, dan mengintegrasikan sistem dengan model prediksi kualitas udara. Dengan demikian, sistem pemantauan kualitas udara berbasis drone ini dapat memberikan kontribusi yang signifikan dalam upaya menjaga kualitas udara dan lingkungan hidup

## UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih kepada DRTPM Kemendikbud Ristek untuk skema PDP 013/L4/SK/VI/JGU/2024 yang telah support untuk penelitian ini. Dan RMC Universitas Global Jakarta yang telah mendukung penelitian ini.

## REFERENSI

- [1] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, "Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) Sebagai Informasi Mutu Udara Ambien di Indonesia," <https://ditppu.menlhk.go.id/portal/read/indeks-standar-pencemar-udara-ispu-sebagai-informasi-mutu-udara-ambien-di-indonesia>.
- [2] E. Kusumaningrum, H. B. Hermawan, Sumarsono, and D. Hariyadi, "Analisis kualitas udara menggunakan internet of things di pintu perlintasan kereta api," *Jurnal CoSciTech (Computer Science and Information Technology)*, vol. 4, no. 3, pp. 574–579, Dec. 2023, doi: 10.37859/coscitech.v4i3.6219.
- [3] Humas BRIN, "BRIN Bahas Peluang dan Tantangan Pemantauan Kualitas Udara di Indonesia," <https://www.brin.go.id/news/114868/brin-bahas-peluang-dan-tantangan-pemantauan-kualitas-udara-di-indonesia>.
- [4] N. Hossein Motlagh et al., "Unmanned Aerial Vehicles for Air Pollution Monitoring: A Survey," *IEEE Internet Things J*, vol. 10, no. 24, pp. 21687–21704, Dec. 2023, doi: 10.1109/JIOT.2023.3290508.
- [5] I. A. Limon, A. D. Hossain, K. F. I. Faruque, M. R. Uddin, and M. Hasan, "Drone-Based Real-Time Air Pollution Monitoring for Low-Access Areas by Developing Mobile-Smart Sensing Technology," in 2023 3rd International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST), IEEE, Jan. 2023, pp. 90–94. doi: 10.1109/ICREST57604.2023.10070050.
- [6] S. Beryozkina and N. Al-Shakhs, "Real-life Application of the Emission Monitoring System by Using a Drone," in 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), IEEE, Jun. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope49358.2020.9160738.
- [7] A. Suroto, A. Ubaidillah, M. Ulum, P. Studi Teknik Elektro, F. Teknik, and U. Trunojoyo Madura, "Monitoring Keadaan Udara Menggunakan UAV (Unmanned Aerial Vehicle) Berbasis Waypoint," 2019.
- [8] F. Zulfiryanisya et al., "Air Quality Monitoring System using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Quadcopter Type Sistem Monitoring Kualitas Udara menggunakan Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Jenis Quadcopter," 2022.
- [9] N. Karna, D. L. Lubna, and S. Y. Shin, "Air Quality Measurement Device Using Programmable Quadcopter Drone Towards Internet of Drone Things," in 2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), IEEE, Oct. 2021, pp. 753–758. doi: 10.1109/ICTC52510.2021.9621039.
- [10] A. Hapsari, Hajamydeen Asif, and M. Abdullah, "A Review on Indoor Air Quality Monitoring using IoT at Campus Environment," *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 7 (4.22), no. 22, pp. 55–60, 2018, Accessed: Mar. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/22191>
- [11] A. A. Hapsari, A. I. Hajamydeen, D. J. Vresdian, M. Manfaluthy, L. Prameswono, and E. Yusuf, "Real Time Indoor Air Quality Monitoring System Based on IoT using MQTT and Wireless Sensor Network," in 2019 IEEE 6th International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS), IEEE, Dec. 2019, pp. 1–7. doi: 10.1109/ICETAS48360.2019.9117518.
- [12] A. A. Hapsari, D. Junesco Vresdian, M. Aldiansyah, B. W. Dionova, and A. C. Windari, "Indoor Air Quality Monitoring System with Node.js and MQTT Application," in 2020 1st International Conference on Information Technology, Advanced Mechanical and Electrical Engineering (ICITAMEE), IEEE, Oct. 2020, pp. 144–149. doi: 10.1109/ICITAMEE50454.2020.9398324.
- [13] B. W. Dionova et al., "Design and Simulation of Environment Indoor Air Quality Monitoring and Controlling System using IoT Technology," in 2023 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), IEEE, Jul. 2023, pp. 494–499. doi: 10.1109/ISITIA59021.2023.10221098.
- [14] L. P. Pratama, M. Manfaluthy, D. J. Vresdian, B. W. Dionova, A. A. Hapsari, and R. Hambali, "Analysis of CO Pollutant Monitoring System Using MAPP32 LORA in Bekasi City," in 2023 Sixth International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering (ICVEE), IEEE, Oct. 2023, pp. 13–18. doi: 10.1109/ICVEE59738.2023.10348348.