

***SIMULASI DAN IMPLEMENTASI MODIFIKASI STRUKTUR UAV DJIS800
EVO SEBAGAI AERIAL MEASUREMENT EDDY COVARIANCE SYSTEM***

(Skripsi)

Oleh:

M Nusapati Dwipa Nusantara

2115031032



PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

2025

ABSTRAK

SIMULASI DAN IMPLEMENTASI SISTEM UAV DJI S800 EVO UNTUK PEMANTAUAN EMISI GAS PADA AREA PERKEBUNAN SAWIT

Oleh

M NUSAPATI DWIPA NUSANTARA

Modifikasi drone DJI S800 EVO digunakan untuk memantau emisi gas di perkebunan sawit. Tujuannya adalah untuk merancang penempatan sensor yang tepat agar data yang didapatkan tetap akurat, meskipun ada turbulensi yang ditimbulkan oleh baling-baling drone. Ada empat sensor yang digunakan, yaitu sensor CO₂, suhu dan kelembaban, metana (CH₄), dan tekanan udara. Untuk mengetahui bagaimana turbulensi memengaruhi sensor, dilakukan simulasi aliran udara menggunakan software SolidWorks. Hasil simulasi menunjukkan bahwa meskipun kecepatan baling-baling tinggi, sensor tetap berada di luar zona turbulensi yang bisa mengganggu pengukuran. Selain itu, meskipun ada perubahan posisi Center of Gravity (CG) setelah penambahan sensor, drone tetap stabil dan tidak ada masalah dalam penerbangan. Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan bisa digunakan dengan baik untuk memantau emisi gas di perkebunan sawit tanpa mengorbankan akurasi data.

Kata Kunci: Drone, pemantauan emisi gas, turbulensi, simulasi CFD, sensor, DJI S800 EVO, Center of Gravity

ABSTRACT

SIMULATION AND IMPLEMENTATION OF DJI S800 EVO UAV SYSTEM FOR GAS EMISSION MONITORING IN PALM OIL PLANTATIONS

By

M NUSAPATI DWIPA NUSANTARA

The DJI S800 EVO drone modification is used for monitoring gas emissions in palm oil plantations. The goal is to design the proper placement of sensors to ensure accurate data collection, even with the turbulence caused by the drone's propellers. Four sensors are used: CO₂ sensor, temperature and humidity sensor, methane (CH₄) sensor, and air pressure sensor. To understand how turbulence affects the sensors, airflow simulations are conducted using SolidWorks software. The simulation results show that despite high propeller speeds, the sensors remain outside the turbulence zones that could interfere with measurements. Additionally, although there is a shift in the Center of Gravity (CG) after adding the sensors, the drone remains stable and faces no issues during flight. This research demonstrates that the developed system can effectively monitor gas emissions in palm oil plantations without compromising data accuracy.

Keywords: Drone, gas emission monitoring, turbulence, CFD simulation, sensors, DJI S800 EVO, Center of Gravity

***SIMULASI DAN IMPLEMENTASI SISTEM UAV DJIS800 EVO UNTUK
PEMANTAUAN EMISI GAS PADA AREA PERKEBUNAN SAWIT***

Oleh

M Nusapati Dwipa Nusantara

Hasil Penelitian

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknik Universitas Lampung



PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

BANDAR LAMPUNG

2025

Judul Skripsi : SIMULASI DAN IMPLEMENTASI
MODIFIKASI STRUKTUR UAV DJIS800
EVO SEBAGAI *AERIAL MEASUREMENT*
EDDY COVARIANCE SYSTEM

Nama Mahasiswa : M Nusapati Dwipa Nusantara
Nomor Pokok Mahasiswa : 2115031032
Program Studi : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



Ing. Melvi, S.T., M.T., Ph.D
NIP 19730118200003 2 001



Mona Arif Muda, S.T., M.T.
NIP 19711112200002 1 002

2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro



Herlinawati, S.T., M.T.
NIP 19710314 199903 2 001

**Ketua Program Studi Teknik
Elektro**



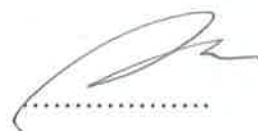
Sumadi, S.T., M.T.
NIP 19731104 200003 1 001

MENGESAHKAN**1. Tim Penguji**

Ketua : Ing. Melvi, S.T., M.T., Ph.D.



Sekretaris : Mona Batubara, S.T., M.T.



Penguji : Ing. Ardian Ulvan, S.T., M.Sc., Ph.D.

**2. Dekan Fakultas Teknik**

Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.

NIP 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 21 Juli 2025 kak

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang sepengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 24 Agustus 2025



M Nusapati Dwipa Nusantara

NPM 2115031032

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Muara Enim pada tanggal 06 September 2002. Penulis merupakan putra kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Supawi Bakir dan Ibu Adella Rosita. Penulis mengawali pendidikan di SD Negeri 18 (2008-2014). Selanjutnya, pendidikan di SMP Ykpp Pendopo (2014-2017) dan melanjutkan pendidikan menengah atas di SMA Ykpp Pendopo pada jurusan Ilmu Pengetahuan Alam (MIPA) dari tahun 2017 hingga 2020. Saat ini, penulis sedang menempuh pendidikan di Universitas Lampung, Program Studi Teknik Elektro, sejak tahun 2021.

Selama masa studi, penulis aktif berkontribusi dalam berbagai kegiatan akademik, organisasi, Penulis merupakan Anggota aktif Drumband SMA Ykpp Pendopo (2019-2020) dan Anggota Aktif Divisi Media Informasi (2022) Sosial dan Kewirausahaan Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (2023).

Penulis berhasil mendapatkan pendanaan Program Kreativitas Mahasiswa (PMW) Universitas Lampung untuk layanan jasa "Pembuatan Smart Green House" dan pendanaan PPK ORMAWA 2023 dengan proyek berjudul "Pengembangan Desa Gisting Permai sebagai Desa Agropolitan dengan Sistem Greenhouse Berbasis Intelligent Control System".

Penulis memiliki keahlian dalam Mendesain drone, mendesain Green house, dan alat bantu analisis seperti Draw.io serta desain seperti Grabcad . Kemampuan bahasa yang dikuasai meliputi Bahasa Indonesia, Inggris.

Dengan latar belakang akademik, pengalaman organisasi, dan prestasi, penulis berharap dapat memberikan kontribusi positif dalam bidang teknologi elektro dan inovasi berbasis drone untuk mendukung kemajuan masyarakat.

PERSEMBAHAN

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Alhamdulillah, Atas Berkah Rahmat Allah yang Maha Kuasa

KUPERSEMBAHKAN KARYA INI UNTUK

Papa dan Mama Tercinta

Supawi Bakir dan Adella Rosita

Saudara-Saudara Tersayang

M Senopati Wilmar Siladja Putra dan Ananda Azra Fauziah

Keluarga Besar, Dosen, Teman, dan Almamater

MOTTO

“Hidup harus tetap slay”

(Penulis)

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah Subhanahu wa Ta'ala, karena dengan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya, Penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Penulisan skripsi ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak.

Skripsi dengan judul “Simulasi Dan Implementasi Modifikasi Struktur UAV DJIS800 Evo Sebagai *Aerial Measurement Eddy Covariance System*” ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Pada kesempatan ini, Penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak dan Ibu Dosen yang telah memberikan bimbingan, saran, nasehat, dan motivasi kepada Penulis.

1. Ing. Melvi, S.T., M.T., Ph.D selaku dosen pembimbing penelitian yang selalu memberikan pengajaran untuk taat pada aturan penulisan yang berlaku untuk meningkatkan kedisiplinan kepada Penulis, nasehat, motivasi serta saran yang membangun kepada Penulis.
2. Mona Arif Muda, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing penelitian yang selalu memberikan pengajaran untuk taat pada aturan penulisan yang berlaku untuk meningkatkan kedisiplinan kepada Penulis, serta memberikan saran dan masukan dalam penelitian yang dibuat oleh Penulis.
3. Ing. Ardian Ulvan, S.T., M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing penelitian yang selalu memberikan saran dan masukan dalam penelitian yang dibuat oleh Penulis.

Selanjutnya, Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, DEA, IPM selaku Rektor Universitas Lampung
2. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung
3. Ibu Herlinawati, S.T., M.T selaku Kepala Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung
4. Bapak Ir. Meizano Ardhi Muhammad, S.T., M.T selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung
5. Bapak Sumadi, S.T., M.T selaku Kepala Program Studi Teknik Elektro Universitas Lampung
6. Bapak Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Akademik
7. Segenap Dosen di Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat, wawasan, dan pengalaman bagi Penulis.

8. Mbak Nurul dan Segenap Staff di Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik yang telah sangat membantu penulis baik dalam hal administrasi dan hal-hal lainnya.
9. Kepada kedua orang tua, kakak, dan adik yang telah memberikan motivasi dalam hidup.
10. Maria Anggelika, Joko Sulistiyo, Dwikashinta Purwanda Putra, Akhmad Satria Akbar dan Kak Nora Adityan yang telah menjadi teman berdiskusi dan memberikan masukan serta *support* selama pengerjaan skripsi ini.
11. Keluarga besar EXCALTO 21, HIMATRO UNILA, TELTI, URO UNILA terima kasih telah memberikan banyak bantuan dan motivasi serta sudah menjadi keluarga sampai saat ini.
12. Semua pihak yang terlibat dalam proses perkuliahan dan penulisan skripsi ini penulis ucapkan terimakasih atas bantuan dan kerjasamanya

Bandar Lampung, Agustus 2025

M Nusapati Dwipa Nusantara

DAFTAR ISI

	HALAMAN
ABSTRAK	ii
HALAMAN JUDUL	iv
LEMBAR PERSETUJUAN	v
LEMBAR PENGESAHAN	vi
SURAT PERNYATAAN	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
PERSEMBAHAN.....	ix
MOTTO	x
SANWACANA.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Rumusan Masalah	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Penelitian Terkait.....	5
2.2 Metody <i>Eddy Covariance</i> untuk pengukuran fluks karbon.....	7
2.3 Gas Karbon.....	8
2.4 <i>Unmanned Aerial Vehicles</i> (UAV).....	8
2.5 <i>Hexacopter</i>	11
2.6 Simulasi <i>Computational Fluid Dynamics</i> (CFD).....	13
2.7 Turbulensi Dalam Penerbangan UAV	15
2.8 Mekanika Material	17

2.8.1 Tegangan (<i>Stress</i>).....	18
2.8.2 Regangan (<i>Strain</i>).....	18
2.9 <i>Center of Gravity</i> (CG).....	19
2.10 Komponen Simulasi	20
2.10.1 Mikrokontroller sebagai Pengatur Sensor	20
2.10.2 Sensor CO ₂	22
2.10.3 Sensor suhu dan kelembaban	23
2.10.4 Sensor CH ₄	24
2.10.5 Sensor tekanan.....	25
2.10.6 Baterai	27
BAB III METODE PENELITIAN	29
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	29
3.2 Capstone Project.....	29
3.3 Komponen dan Perangkat Lunak	31
3.4 Metodologi	32
3.4.1 Tahap <i>Pre-Processing</i>	34
3.4.1.1 Menyiapkan model simulasi alat.....	34
3.4.1.2 <i>Meshing</i>	35
3.4.1.3 <i>Setting boundary condition</i>	36
3.4.2 Tahap <i>Solution Solver</i>	37
3.4.3 Tahap <i>Post-Processing</i>	37
3.5 Simulasi	38
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	50
4.1 Modifikasi <i>Aerial Measurement Eddy Covariance System</i> (AMES)	50
4.1.1 Desain sistem dan simulasi Drone	50
4.1.2 Pengukuran kecepatan putaran Propeller (Rpm) Drone DJI S800	52
4.2 Pengaturan Kondisi Lingkungan pada Simulasi CFD.....	53
4.3 Simulasi Computational Fluida Dynamic Berdasarkan RPM Tachometer ..	58
4.3.1 Simulasi Computational Fluida Dynamic pada RPM 12196	58
4.3.2 Simulasi Computational Fluida Dynamic pada RPM 18440	61
4.3.3 Simulasi Computational Fluida Dynamic pada RPM 20312	64

4.4 Penilaian Center of Gravity (CG).....	67
4.5 Validasi Penempatan Sensor	69
4.5.1 Validasi Berdasarkan Simulasi RPM.....	69
4.5.2 Validasi Berdasarkan Kondisi Lingkungan	69
4.5.3 Validasi Berdasarkan Stabilitas Center of Gravity (CG).....	70
BAB V PENUTUP.....	71
5.1 Kesimpulan.....	71
5.2 Rekomendasi untuk Penelitian Selanjutnya	72
 DAFTAR PUSTAKA.....	 73

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 <i>Jenis-jenis UAV</i>	8
Gambar 2.2 <i>Drone Hexacopter</i>	11
Gambar 2.3 Mikrokontroller Arduino.....	20
Gambar 2.4 Sensor CO2	21
Gambar 2.5 Sensor Suhu dan Kelembaban.....	23
Gambar 2.6 Sensor CH4	24
Gambar 2.7 Sensor Tekanan	25
Gambar 2.8 Baterai	26
Gambar 3.1 <i>Capstone Project</i>	29
Gambar 3.2 Diagram alir metodologi penelitian.....	32
Gambar 3.3 Perancangan Desain <i>Aerial Measurement Eddy System</i> (AMES)	33
Gambar 3.4 Model CAD	34
Gambar 3.5 <i>Meshing</i> pada Solidwork.....	35
Gambar 3.6 Hasil <i>meshing</i> pada <i>Flow simulation</i>	37
Gambar 3.7 Hasil simulasi tanpa payload SolidWorks.....	39
Gambar 3.8 keadaan simulasi turbulensi tanpa payload saat motor berada di kecepatan 400 rpm	41
Gambar 3.9 keadaan simulasi turbulensi tanpa payload saat motor berada di kecepatan 3000 rpm	42
Gambar 3.10 keadaan simulasi turbulensi tanpa payload saat motor berada di kecepatan 10000 rpm	43

Gambar 3.7 Hasil simulasi SolidWorks dengan Payload.....	44
Gambar 3.11 Keadaan Turbelensi saat motor berada dikecepatan 400RPM.....	45
Gambar 3.12 Keadaan Turbelensi saat motor berada dikecepatan 1200RPM.....	46
Gambar 3.13 Keadaan Turbelensi saat motor berada dikecepatan 3000RPM.....	47
Gambar 3.14 Keadaan Turbelensi saat motor berada dikecepatan 6000RPM.....	48
Gambar 3.12 Keadaan Turbelensi saat motor berada dikecepatan 10000RPM....	49
Gambar 4.1 Design Drone Pada Solidwork	50
Gambar 4.2 berat dan <i>Center of Gravity</i> simulasi.....	51
Gambar 4.3 Pengambilan nilai Rpm pada drone Dji S800 Evo pada throttle 50%, 75% dan 100%.....	53
Gambar 4.4 Settingan parameter kondisi pagi hari.....	55
Gambar 4.5 Settingan parameter kondisi Siang hari.....	56
Gambar 4.6 Settingan parameter kondisi Sore hari	57
Gambar 4.7 Simulasi solidwork pada 12196 RPM pagi hari.....	58
Gambar 4.8 Simulasi solidwork pada 12196 RPM siang hari	59
Gambar 4.9 Simulasi solidwork pada 12196 RPM sore hari	60
Gambar 4.10 Simulasi solidwork pada 18440 RPM pagi hari.....	61
Gambar 4.11 Simulasi solidwork pada 18440 RPM siang hari	62
Gambar 4.12 Simulasi solidwork pada 18440 RPM sore hari	63
Gambar 4.13 Simulasi solidwork pada 20221 RPM pagi hari.....	64
Gambar 4.14 Simulasi solidwork pada 20221 RPM siang hari	65
Gambar 4.15 Simulasi solidwork pada 20221 RPM sore hari	66
Gambar 4.16 kondisi awal drone tanpa tambahan sensor	67
Gambar 4.17 Kondisi Drone dengan penambahan sensor dan struktur pendukung	67
Gambar 4.18 Grafik perbandingan posisi Center of Gravity (CG) UAV sebelum dan sesudah modifikasi AMES pada sumbu x, y, dan z.	68
Gambar 4.18 Tunningan PID Sebagai kompensasi Center of gravity dengan Payload.....	69

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Spesifikasi Mikrokontroler Arduino	21
Tabel 2.2 Spesifikasi Sensor CO2	23
Tabel 2.3 Spesifikasi Sensor Suhu dan Kelembaban.	24
Tabel 2.4 Spesifikasi Sensor CH4	25
Tabel 2.5 Spesifikasi Tekanan.	26
Tabel 2.6 spesifikasi Baterai	28
Tabel 3.1 Komponen dan Perangkat Lunak pada Perangkat	31
Tabel 3.2 <i>setting</i> parameter	38
Tabel 4.1 Simulasi Center of mass	51
Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Kecepatan Propeller	52
Tabel 4.3 Parameter Atmosfer Berdasarkan Waktu	54

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Gas karbon dioksida (CO_2) adalah salah satu gas rumah kaca yang berperan penting dalam perubahan iklim global. Konsentrasi CO_2 di atmosfer terus meningkat seiring dengan aktivitas manusia yang menghasilkan emisi CO_2 , seperti pembakaran bahan bakar fosil, deforestasi, dan pertanian. Kenaikan konsentrasi CO_2 dapat menyebabkan peningkatan suhu rata-rata bumi, perubahan pola curah hujan, peningkatan frekuensi dan intensitas bencana alam serta gangguan ekosistem. Oleh karena itu diperlukan pemantauan konsentrasi CO_2 secara akurat dan kontinu untuk mengukur seberapa besar dampak emisi CO_2 terhadap lingkungan[1].

Salah satu metode pemantauan konsentrasi CO_2 yang banyak digunakan adalah *Eddy Covariance*, yaitu metode untuk mengukur fluktuasi kecepatan angin dan konsentrasi gas secara bersamaan untuk menghitung laju pertukaran massa dan energi antara permukaan tanah dan atmosfer. Metode *Eddy Covariance* biasanya menggunakan perangkat yang ditempatkan di menara atau bangunan tinggi untuk mengukur konsentrasi CO_2 di atas kanopi vegetasi atau permukaan air. Namun, metode ini memiliki beberapa keterbatasan, seperti biaya instalasi dan operasi tinggi, ruang lingkup pengukuran yang terbatas, dan kesulitan dalam menempatkan perangkat di lokasi yang sulit dijangkau.

Solusi untuk mengatasi keterbatasan tersebut maka perangkat *Eddy Covariance* dikembangkan yaitu perangkat *Eddy Covariance* dipasang pada wahana udara tanpa awak *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) atau drone. Perangkat *Eddy Covariance* dapat bergerak secara fleksibel di udara untuk mengukur konsentrasi CO_2 di berbagai Lokasi dan ketinggian dengan resolusi spasial dan temporal yang tinggi. Perangkat *Eddy Covariance* juga dapat mengurangi biaya instalasi dan operasi, serta meningkatkan aksesibilitas dan mobilitas perangkat *Eddy Covariance*.

[2]. Perangkat *Eddy Covariance* merupakan inovasi baru dalam bidang pemantauan konsentrasi CO_2 yang dapat memberikan informasi yang lebih lengkap dan akurat tentang dinamika CO_2 yang dapat memberikan informasi yang lebih lengkap dan akurat tentang dinamika CO_2 di atmosfer.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang penempatan sensor yang reliable dan efisien sehingga dapat diaplikasikan.
2. Mengetahui aliran fluida yang disebabkan oleh perputaran baling baling drone di segala arah.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang penempatan empat sensor (Sensor CO_2 , Sensor suhu dan kelembaban, Sensor CH_4 , dan Sensor tekanan) pada *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) untuk memastikan akurasi dan keandalan data yang diperoleh.
2. Mengetahui apakah turbulensi udara yang diakibatkan oleh perputaran propeller drone dapat mempengaruhi pembacaan sensor melalui simulasi CFD menggunakan simulator solidwork.

1.4 Batasan Masalah

Adapun Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Drone* yang digunakan pada perangkat merupakan DJI S800 EVO yang dimodifikasi.
2. Perangkat sensor yang digunakan merupakan perangkat yang digunakan pada penelitian sebelumnya.
3. Variable yang diukur pada penelitian adalah *center of gravity* (CG) pada peletakan sensor gas karbon dioksida (CO_2), Konsentrasi gas metana (CH_4), kelembapan udara dan tekanan udara.

4. Pengukuran ini dilakukan di atas lahan sawit dengan ketinggian 30m dan 50m diatas permukaan tanah.

5. Simulasi yang dijalankan menggunakan aplikasi *software Solidworks*.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian adalah mendapatkan hasil pengukuran karbon di udaran menggunakan *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)* agar dapat dimanfaatkan untuk pemantauan emisi gas karbon. Alat ini juga dibuat agar dapat terbang dengan tidak menimbulkan interferensi sensor pada saat pengukuran dan dapat menyimpan data secara real time.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dari penulisan laporan seminar proposal ini adalah:

BAB 1. PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang, tujuan penelitian, rumusan masalah, Batasan masalah, manfaat Penelitian dan sistematika penulisan pada penelitian ini.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan Pustaka berisi pemaparan berbagai teori pendukung serta referensi materi yang diperoleh dari berbagai sumber, termasuk buku, jurnal, dan penelitian ilmiah yang relevan, yang digunakan dalam penulisan laporan tugas akhir ini.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

Metodelogi penelitian menjelaskan tentang waktu dan tempat penelitian, perangkat yang digunakan, metode penelitian yang diterapkan, serta diagram alir penelitian yang menggambarkan alur proses penelitian.

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian yang dilakukan diuraikan pada bab ini, dengan analisis dan penjelasan mendalam.

BAB 5. PENUTUP

Bab penutup berisikan refleksi penulis mengenai hal-hal penting yang ditemukan dalam penelitian, serta rekomendasi yang diharapkan dapat memberikan perspek baru mengenai tema yang dibahas dalam penelitian ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Terkait dengan penelitian ini, kajian terhadap penelitian-penelitian sebelumnya sangat penting untuk dilakukan guna memperluas wawasan penulis mengenai topik yang diteliti. Kajian Pustaka tidak hanya membantu dalam memperdalam dalam menghindari resiko plagiarisme dan duplikasi penelitian yang telah ada. Kajian ini bertujuan untuk menentukan posisi penelitian ini dalam konteks penelitian serupa, serta diharapkan dapat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap perkembangan tema penelitian di masa mendatang. Berikut ini disajikan beberapa ulasan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan metode yang digunakan serta hasil yang telah dicapai.

Penelitian yang dilakukan oleh Yibo Sun, Junyoung Ma, Bilige Sude, Xingwen Lin, Haolu Shang, Bing Geng, Zhaoyan Diao, Jiaqiang Du, dan Zhanjun Quan pada tahun 2021 dengan judul penelitian “*A UAV Based Eddy Covariance System for measurement of Mass and Energy Exchange of the Ecosystem: Preliminary Result*”[3]. Pada penelitian ini dilakukan perancangan UAV yang digunakan adalah model quad plane, dan hasil pengukuran dibandingkan dengan data dari menara darat. Hasilnya menunjukkan bahwa fluks panas nyata yang diukur UAV lebih rendah dibandingkan dengan pengukuran menara darat, dengan selisih sekitar 28,1 W/m². Fluks panas laten juga lebih rendah dengan perbedaan sekitar 13,1 W/m², begitu pula dengan fluks CO₂ yang lebih rendah sekitar 0,02 mg/m²/s dan kecepatan friksi yang lebih kecil sekitar 0,04 m/s. Untuk memastikan akurasi pengukuran, sensor-sensor dipasang dengan posisi yang optimal. *5-Hole Turbulence Probe* ditempatkan di bagian depan UAV, sekitar 433,5 mm dari hidung pesawat, agar tidak terganggu oleh aliran udara UAV. *CO₂/H₂O Gas Analyzer* dipasang di bawah hidung UAV, berdekatan dengan turbulence probe, dengan peredam getaran untuk mengurangi efek dari mesin dan baling-baling. GPS/INS ditempatkan di pusat gravitasi UAV dengan dua antena GPS yang terpasang sejajar di sepanjang badan pesawat dengan jarak 1,1 meter untuk meningkatkan akurasi navigasi. Selain itu, *Platinum Resistance Thermometer* dan *Thermistor* dipasang di bagian bawah UAV

untuk mengukur suhu dengan cepat dan akurat. *Net Radiometer* diletakkan di ujung sayap kiri untuk mengukur radiasi bersih, sementara di ujung sayap kanan dipasang alat serupa untuk menjaga keseimbangan pesawat. *PAR Radiometers* juga dipasang di bagian atas dan bawah UAV untuk mengukur radiasi fotosintetik aktif. Kesimpulan dari penelitian ini sistem EC berbasis UAV mampu menangkap pola perubahan fluks turbulen dengan baik, meskipun hasilnya lebih rendah dibandingkan dengan pengukuran menara darat. Sistem ini tetap dapat digunakan untuk studi ekosistem dalam skala yang lebih luas dengan keunggulan fleksibilitas dan jangkauan yang lebih besar dibandingkan metode berbasis darat.[3].

Pada penelitian Fariz Zulfiryanasyah, Syamsudduha Syahririni, dan M. Nizar Habibi [4], telah dikembangkan sistem pemantauan kualitas udara menggunakan Unmanned Aerial Vehicle (UAV) jenis quadcopter untuk merancang alat pemantauan udara yang efektif dengan memanfaatkan berbagai sensor. Alat yang dibuat menggunakan sensor MiCS-6814 untuk mengukur gas CO dan NO₂, serta MQ-135 untuk mengukur gas SO₂, bersama dengan beberapa sensor lainnya yang akan mengirimkan data ke Blynk melalui jaringan internet. Hasil pengujian menunjukkan bahwa konsentrasi gas SO₂ mencapai 1,26 ppm, melebihi ambang batas mutu udara sebesar 0,34 ppm. Konsentrasi gas NO₂ adalah 0,4 ppm, yang juga melebihi ambang batas 0,21 ppm. Gas CO terdeteksi sebesar 3,17 ppm, masih di bawah ambang batas 26,18 ppm. Partikulat debu terukur pada 34,31 µg/Nm³, lebih kecil dari baku mutu 230 µg/Nm³. Suhu lingkungan yang tercatat adalah 25,9°C dengan kelembapan sebesar 63%. Sensor-sensor tersebut ditempatkan dalam sebuah *project box*, yang kemudian direkatkan ke drone menggunakan *velcro*. Namun, tidak dijelaskan secara rinci mengenai posisi spesifik peletakan sensor pada drone, seperti apakah diletakkan di bagian bawah, di lengan, atau di bagian tertentu lainnya untuk optimalisasi pengukuran udara. Alat ini memungkinkan pemantauan kualitas udara jarak jauh secara real-time melalui smartphone, memberikan solusi yang praktis untuk pengawasan kualitas udara berdasarkan parameter yang telah ditentukan [4].

Kemudian pada penelitian Mihai-Alin Stamate, Cristina Pupăză, Florin-Adrian Nicolescu dan Cristian Emil Moldoveanu[5], penelitian ini menghasilkan rekomendasi praktis untuk meningkatkan stabilitas dan manuver UAV, termasuk

integrasi komponen avionik, akuisisi video, transmisi data telemetri, serta strategi untuk pengembangan sistem kendali jarak jauh di luar garis pandang (*BVLOS*) untuk menunjukkan relevansi simulasi dan analisis CFD dalam desain dan pengoptimalan UAV.[5]

2.2 Metody *Eddy Covariance* untuk pengukuran fluks karbon

Metode *Eddy Covariance* adalah teknik yang digunakan untuk mengukur fluks gas, seperti karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dan uap air, antara permukaan bumi dan atmosfer. Metode ini sangat penting dalam penelitian lingkungan, ekologi, dan ilmu atmosfer karena memberikan data yang diperlukan untuk memahami pertukaran gas serta proses biogeokimia di berbagai ekosistem [6, 7]. Prinsip dasar metode ini didasarkan pada variabilitas turbulen dalam aliran udara, dimana fluks gas dihitung dari pengukuran simultan konsentrasi gas dan kecepatan aliran udara [7]. Sistem *Eddy Covariance* terdiri dari komponen utama, yaitu *anemometer sonic* yang mengukur kecepatan dan arah angin dalam tiga dimensi, *gas analyzer* yang mengukur konsentrasi gas tertentu, serta *data logger* yang mencatat dan menyimpan data. Proses pengukuran dimulai dengan pengumpulan data kecepatan angin dan konsentrasi gas pada interval waktu yang sangat cepat. Data ini kemudian dianalisis untuk menghitung fluks gas berdasarkan kovarians antara fluktuasi kecepatan angin vertikal (w') dan fluktuasi konsentrasi gas (c'). Rumus dasar yang digunakan seperti pada persamaan 2.1.

$$F = \overline{w'c'} \dots\dots\dots(2.1)$$

di mana (F) adalah fluks gas, w' adalah fluktuasi kecepatan vertikal, dan c' adalah fluktuasi konsentrasi gas terhadap satuannya yaitu [7].

Perangkat yang menerapkan metode *Eddy Covariance* memiliki peran signifikan dalam studi ekosistem untuk memahami pertukaran energi dan materi. Komponen utamanya meliputi *anemometer sonic*, *gas analyzer*, dan *data logger*. Stasiun ini memberikan data *real-time* tentang fluks gas, menjadikannya alat yang sangat berguna dalam berbagai aplikasi, termasuk studi karbon untuk memantau fluks CO_2 , dampak perubahan iklim terhadap pertukaran gas, dan manajemen sumber daya alam, seperti pengelolaan hutan dan lahan pertanian. Metode *Eddy Covariance*

memiliki banyak keunggulan, seperti kemampuan memberikan data *real-time* dan penerapannya yang luas di berbagai jenis ekosistem, termasuk hutan, lahan pertanian, dan area yang terbakar. Namun, terdapat tantangan yang harus dihadapi, termasuk kebutuhan akan kalibrasi dan perlunya pemeliharaan yang tepat untuk memastikan akurasi data serta pengaruh faktor lingkungan seperti kelembapan, suhu, dan kondisi cuaca terhadap hasil pengukuran.

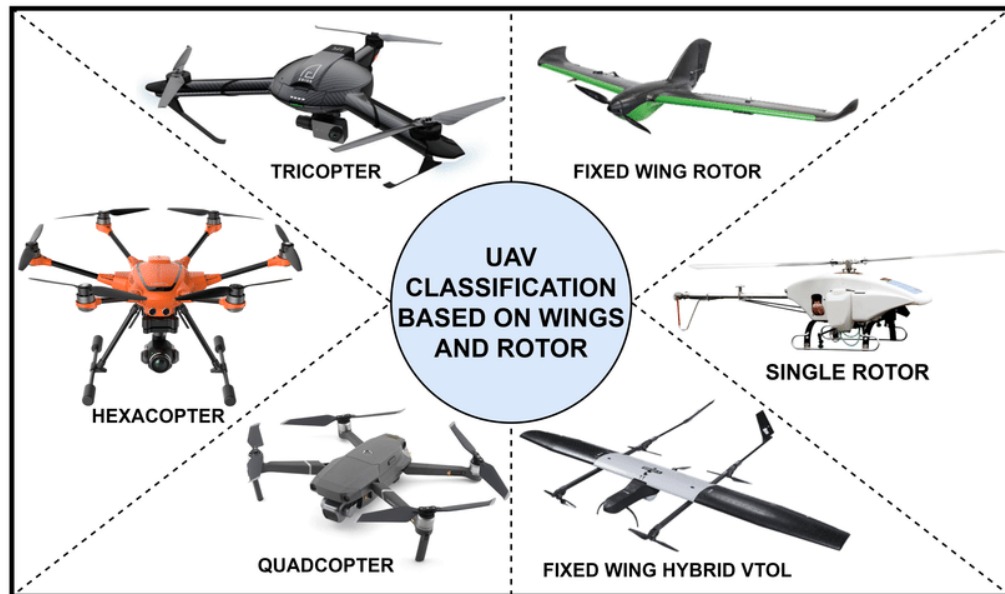
Secara keseluruhan, metode *Eddy Covariance* merupakan alat yang sangat penting dalam penelitian lingkungan dan ekologi. Dengan memahami fluks karbon dan interaksi antara atmosfer dan biosfer, metode ini memberikan wawasan penting tentang proses biogeokimia dan berkontribusi pada pemahaman yang lebih baik tentang dampak perubahan iklim serta potensi pengelolaan ekosistem secara berkelanjutan.

2.3 Gas Karbon

Gas karbon merupakan suatu komponen penting dalam pemantauan perubahan iklim global. Gas-gas ini, terutama karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4) dan nitrat oksida (N_2O), berperan dalam efek rumah kaca yang menyebabkan peningkatan suhu global. CO_2 , sebagai hasil pembakaran bahan bakar fosil dan deforestasi, telah menjadi gas rumah kaca utama yang menyebabkan pemanasan global. Metana, Sebagian besar berasal dari aktivitas pertanian dan industry, juga berperan penting dalam peningkatan suhu. N_2O , di sisi lain, berasal dari berbagai aktivitas manusia, termasuk pertanian dan pemakaian nitrogen dalam pupuk. Pemahaman tentang konsentrasi dan dampak gas-gas ini di atmosfer sangat penting untuk mitigasi perubahan iklim[8].

2.4 *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV)

Unmanned Aerial Vehicles (UAV) adalah pesawat tanpa awak yang dikendalikan dari jarak jauh atau dapat terbang secara *autonomous* berdasarkan rute yang deprogram. UAV dapat diklasifikasikan berdasarkan ukuran, jangkauan, dan kapabilitasnya. Berdasarkan desain structural, UAV dapat dikategorikan sebagai *fixed wings*, *multirotor*, *Vertical Take-off and Landing* (VTOL), dan *single rotor*.



Gambar 2.1 Jenis-jenis *UAV* [9]

Dapat dilihat pada gambar 2.1 *UAV Fixed-wing* memiliki daya tahan terbang yang lebih lama dibandingkan *UAV multirotor*, dengan rata-rata waktu terbang 1 hingga 24 jam, tergantung pada sistem tenaga yang digunakan. Jarak tempuhnya juga lebih jauh, bisa mencapai 100 hingga 1.500 km, tergantung pada desain dan bahan bakarnya. *UAV* jenis ini mampu beroperasi pada ketinggian 1.000 hingga 10.000 meter, sementara model militer seperti RQ-4 Global Hawk bahkan dapat mencapai 18.000 meter. Dengan jangkauan luas, *UAV Fixed-wing* dapat mensurvei area hingga 1.000 km² dalam satu misi, menjadikannya ideal untuk pemetaan wilayah besar dan pemantauan lingkungan skala luas [10,11]. Kapasitas beban *UAV Fixed-wing* bervariasi tergantung ukurannya, dari 5 kg untuk model kecil hingga lebih dari 200 kg untuk model militer atau industri. *UAV* ini dapat membawa berbagai sensor sekaligus, seperti kamera RGB, multispektral, LiDAR, serta sensor gas dan cuaca untuk keperluan survei dan penelitian atmosfer.

UAV VTOL (Vertical Take-Off and Landing) menggabungkan keunggulan *Fixed-wing* dan *multirotor*. *UAV* ini mampu lepas landas dan mendarat secara vertikal, tetapi tetap memiliki efisiensi aerodinamis seperti *Fixed-wing*. Kecepatan jelajahnya biasanya berada di kisaran 50 hingga 150 km/jam, dengan waktu terbang 1 hingga 6 jam. *UAV VTOL* digunakan dalam berbagai aplikasi, terutama yang memerlukan fleksibilitas dalam *takeoff* dan *landing* di area terbatas, seperti

pemetaan wilayah terpencil atau pemantauan bencana. Desain aerodinamis VTOL sangat penting dalam menjaga efisiensi penerbangan dan kestabilan, terutama dalam konfigurasi lengan yang mempengaruhi distribusi gaya aerodinamika dan daya dorong. Optimasi konfigurasi lengan VTOL menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dapat meningkatkan performa aerodinamis, yang berkontribusi pada kestabilan dan efisiensi energi selama penerbangan [10]. UAV VTOL umumnya memiliki kapasitas beban antara 2 hingga 20 kg, tergantung pada ukuran dan desainnya. UAV ini dapat membawa kamera, LiDAR, sensor gas, dan peralatan komunikasi secara bersamaan untuk berbagai kebutuhan pemantauan.

Sementara itu, UAV *multirotor*, seperti *quadcopters*, *hexacopters*, dan *octocopters*, memiliki kemampuan manuver yang lebih tinggi dan dapat terbang stabil di ketinggian rendah, biasanya antara 50 hingga 500 meter. Jangkauan operasionalnya lebih terbatas dibandingkan *Fixed-wing*, sekitar 5 hingga 10 km, dengan waktu terbang 20 hingga 60 menit, tergantung pada kapasitas baterai dan beban yang dibawa. UAV ini sering digunakan dalam aplikasi seperti inspeksi infrastruktur, pemantauan tanaman, serta pengumpulan data visual beresolusi tinggi melalui sensor optik atau kamera multispektral. Kapasitas beban UAV *multirotor* biasanya berkisar antara 1 hingga 15 kg, dengan model yang lebih besar seperti hexacopter dan octocopter mampu membawa lebih banyak peralatan. UAV ini umumnya digunakan untuk membawa kamera RGB, multispektral, termal, dan sensor gas, tergantung pada misi yang dijalankan.

UAV dapat bekerja karena dilengkapi dengan berbagai sensor dan kamera yang memungkinkan pengumpulan data secara efisien. Sensor seperti LiDAR, kamera RGB, multispektral, termal, dan gas memungkinkan UAV untuk melakukan berbagai tugas mulai dari pemetaan 3D, analisis pertumbuhan tanaman, hingga pemantauan kualitas udara. Dalam aplikasi pertanian, UAV menggunakan sensor multispektral untuk memantau kesehatan tanaman dengan mendeteksi pola reflektansi cahaya yang tidak terlihat oleh mata manusia. Kamera termal dapat digunakan untuk mendeteksi suhu lahan atau tanda-tanda awal kebakaran hutan. Dalam pemantauan ekosistem, UAV juga digunakan dalam sistem eddy covariance untuk mengukur pertukaran massa dan energi di lingkungan, seperti CO₂ dan panas laten [11].

Selain itu, UAV juga digunakan dalam simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) untuk menganalisis turbulensi, distribusi tekanan, dan pola aliran udara yang mempengaruhi stabilitas penerbangan. UAV dapat membawa sensor seperti anemometer, pitot tube, dan sensor tekanan diferensial untuk mengukur turbulensi secara langsung. Sensor ini dipasang di area dengan gangguan aerodinamis minimal, seperti bagian depan atau bawah sayap untuk UAV Fixed-wing, serta di lengan atau badan utama untuk UAV multirotor. Dengan teknologi ini, UAV menjadi platform pengujian aerodinamika, yang memungkinkan analisis dampak turbulensi terhadap performa penerbangan dan sensor yang digunakan.

2.5 Hexacopter

Hexacopter adalah salah satu jenis Unmanned Aerial Vehicles (UAV) yang memiliki enam rotor yang terpasang pada enam lengan simetris. Dengan tambahan dua rotor dibandingkan quadcopter, hexacopter memiliki stabilitas yang lebih baik, kapasitas angkut lebih besar, serta redundansi yang memungkinkan UAV tetap dapat terbang meskipun salah satu rotor mengalami kegagalan. Setiap lengan hexacopter berfungsi sebagai penopang motor dan propeller yang menghasilkan daya dorong vertikal, sekaligus menahan dan mendistribusikan beban dari muatan, baterai, serta komponen elektronik lainnya. Selain itu, lengan-lengan ini dirancang untuk mengurangi getaran, sehingga meningkatkan kestabilan selama penerbangan, terutama saat membawa sensor presisi tinggi. Material yang digunakan umumnya berupa serat karbon, aluminium, atau komposit untuk memastikan rasio kekuatan terhadap berat yang optimal.



Gambar 2.2 *Drone Hexacopter* [12]

Dapat dilihat pada gambar 2.2, Hexacopter dapat membawa beban tambahan berdasarkan gaya dorong yang dihasilkan oleh keenam rotor. Total gaya dorong yang dibutuhkan untuk mengangkat UAV harus lebih besar dari total berat UAV dan muatannya. Secara matematis, keseimbangan gaya dalam kondisi melayang (*hovering condition*) dapat dinyatakan dengan

$$T_{total} = m_{total} \cdot g \dots\dots\dots 2.2$$

di mana:

- T_{total} = total thrust yang dibutuhkan untuk melayang (N)
- M_{total} = massa total UAV + payload (kg)
- g = percepatan gravitasi (9.81 m/s^2)

karena hexacopter memiliki enam rotor, maka thrust yang harus dihasilkan oleh masing-masing motor adalah

$$T_{motor} = \frac{T_{total}}{6} = \frac{m_{total} \cdot g}{6} \dots\dots\dots 2.3$$

Untuk memastikan hexacopter dapat terbang dengan aman, total thrust yang tersedia harus lebih besar dari minimum yang dibutuhkan. Biasanya, nilai *thrust-to-weight ratio* (T-W-R) direkomendasikan minimal ≥ 2 untuk menjaga stabilitas dalam manuver. Oleh karena itu, thrust yang disarankan dihitung sebagai [13] :

$$T_{ideal} = 2 \cdot m_{total} \cdot g \dots\dots\dots(2.4)$$

Beban maksimum yang dapat dibawa hexacopter dapat dihitung dengan mengetahui total daya dorong yang mampu dihasilkan oleh seluruh motor, menggunakan persamaan berikut :

$$M_{max} = \frac{T_{total}}{g} - m_{frame} \dots\dots\dots(2.5)$$

di mana:

- m_{max} = beban maksimum yang dapat dibawa hexacopter (kg)
- m_{frame} = massa rangka hexacopter tanpa payload (kg)

hexacopter sering digunakan untuk mengumpulkan data presisi tinggi dengan memasang berbagai sensor dan kamera untuk melakukan survey udara dan pemetaan. UAV ini menjadi pilihan utama untuk pengambilan gambar udara berkualitas tinggi dan telah diterapkan dalam operasi pencarian dan penyelamatan, inspeksi infrastruktur, serta pemantauan lingkungan. Dengan penelitian dan pengembangan yang terus dilakukan, hexacopter semakin dioptimalkan dalam hal efisiensi energi, pengurangan getaran, dan peningkatan kapasitas beban agar dapat membawa lebih banyak sensor tanpa mengorbankan kestabilan penerbangan. Dalam studi aerodinamika, hexacopter juga digunakan dalam *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk menganalisis distribusi tekanan dan pola aliran udara, yang membantu dalam meningkatkan desain struktural dan performa penerbangan [14].

2.6 Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah cabang dari mekanika fluida yang menggunakan metode numerik untuk menganalisis dan mensimulasikan aliran fluida serta interaksinya dengan objek dalam suatu sistem [15]. Dalam konteks UAV, CFD digunakan untuk memahami karakteristik aerodinamika, termasuk

distribusi tekanan, gaya angkat (lift), gaya hambat (drag), serta fenomena turbulensi yang terjadi selama penerbangan.

Aliran fluida dalam CFD dijelaskan melalui persamaan dasar mekanika fluida, yaitu persamaan kekekalan massa (kontinuitas), persamaan kekekalan momentum (Navier-Stokes), dan persamaan kekekalan energi[16]. Persamaan kekekalan massa menyatakan bahwa massa dalam sistem tertutup tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, yang secara matematis dirumuskan sebagai :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \dots\dots\dots 2.6$$

Dimana :

ρ : Massa jenis , satuannya adalah kg/m^3 .

V : Kecepatan fluida , satuannya adalah m/s .

$\frac{\partial \rho}{\partial t}$: Perubahan massa jenis terhadap waktu, satuannya adalah $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$.

$\nabla \cdot (\rho V)$: Divergensi fluks massa, satuannya adalah $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$.

Selain itu, dinamika aliran fluida juga dipengaruhi oleh persamaan kekekalan momentum, atau yang dikenal sebagai persamaan Navier-Stokes. Persamaan ini merupakan turunan dari hukum kedua Newton, yang menyatakan bahwa perubahan momentum suatu fluida terjadi akibat gaya eksternal yang bekerja padanya. Persamaannya adalah

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V V) = - \nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g \dots\dots\dots 2.7$$

di mana:

- p = tekanan (Pa)
- τ = tensor tegangan viskositas (N/m^2)
- ρg = gaya akibat gravitasi (N/m^3)

Persamaan ini menjadi dasar dalam pemodelan CFD untuk menganalisis bagaimana tekanan, viskositas, dan gaya eksternal mempengaruhi pergerakan fluida di sekitar UAV.

Dalam simulasi CFD, turbulensi menjadi salah satu faktor utama yang diperhitungkan, terutama dalam penerbangan UAV multirotor dan Fixed-wing. Aliran turbulen membentuk pusaran kecil atau eddy, yang mempengaruhi distribusi tekanan dan gaya aerodinamika pada drone. Fenomena ini berkaitan erat dengan eddy flux, yaitu perpindahan massa dan energi akibat fluktuasi turbulen. Secara matematis, eddy flux dinyatakan dengan pendekatan rata-rata Reynolds sebagai:

$$F = \overline{u's'} \dots\dots\dots 2.8$$

di mana:

- F_s = eddy flux suatu zat s
- u' = fluktuasi kecepatan turbulen
- s' = fluktuasi konsentrasi zat akibat turbulensi

Dalam simulasi UAV menggunakan CFD, eddy flux sangat penting dalam pemodelan aerodinamika untuk mengidentifikasi pola aliran udara, potensi wake turbulence, serta distribusi tekanan di sekitar drone. Selain itu, UAV yang dilengkapi dengan sensor dapat digunakan dalam sistem *eddy covariance*, yang memungkinkan pengukuran fluks gas atmosfer seperti CO₂ dan uap air secara langsung. Dengan memanfaatkan simulasi CFD dan pendekatan matematis ini, UAV dapat dirancang dengan struktur aerodinamis yang lebih optimal, memastikan penempatan sensor yang lebih akurat, serta meningkatkan efisiensi penerbangan dengan meminimalkan gangguan turbulensi. [17]

2.7 Turbulensi Dalam Penerbangan UAV

Turbulensi adalah fenomena aliran udara yang tidak stabil dan acak yang terjadi akibat perbedaan tekanan, kecepatan, dan suhu di atmosfer. Dalam penerbangan UAV, turbulensi dapat mempengaruhi stabilitas, kontrol, dan efisiensi aerodinamis drone. Pada UAV multirotor, turbulensi di sekitar baling-baling dapat mengganggu distribusi daya dorong (*thrust*) dan menyebabkan fluktuasi posisi saat melayang. Selain itu, vorteks yang dihasilkan oleh propulsi dapat mempengaruhi akurasi sensor atmosferik yang dipasang pada drone.

Dalam kasus UAV sayap tetap, turbulensi berperan dalam menentukan efisiensi aerodinamika dan kestabilan penerbangan. Aliran udara yang tidak teratur dapat menyebabkan gangguan pada sayap, mengubah gaya angkat (*lift*), dan meningkatkan hambatan udara (*drag*). Untuk mengurangi efek turbulensi, berbagai pendekatan telah dikembangkan, seperti penggunaan kontrol otomatis pada permukaan kemudi dan desain aerodinamis yang lebih optimal.

Secara matematis, turbulensi dalam aliran fluida dijelaskan menggunakan **persamaan Navier-Stokes**, yang merupakan dasar untuk menganalisis dinamika fluida:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \dots \dots \dots 2.9$$

Di mana:

- $\mathbf{u}$ = kecepatan aliran udara (m/s)
- t = waktu (s)
- p = tekanan udara (Pa)
- ρ = densitas udara (kg/m³)
- ν = viskositas kinematik (m²/s)
- $\mathbf{f}$ = gaya eksternal per satuan massa (N/kg)

Persamaan ini menggambarkan keseimbangan antara perubahan momentum, tekanan, viskositas, dan gaya eksternal dalam aliran fluida. Namun, karena sifatnya yang non-linear dan kompleks, solusi analitis dari persamaan Navier-Stokes untuk aliran turbulen seringkali sulit diperoleh dan memerlukan pendekatan numerik seperti *Computational Fluid Dynamics* (CFD).[18]

Karakteristik aliran turbulen pada UAV dapat ditentukan menggunakan bilangan Reynolds (Re), yang menentukan apakah aliran udara bersifat laminar atau turbulen:

$$Re = \frac{\rho U L}{\mu} = \frac{U L}{\nu} \dots \dots \dots 2.10$$

Di mana:

- U = kecepatan karakteristik aliran (m/s)
- L = panjang karakteristik atau skala panjang (m)
- μ = viskositas dinamis (Pa·s)
- ν = viskositas kinematik (m²/s)

Bilangan Reynolds merupakan parameter tanpa dimensi yang menunjukkan rasio antara gaya inersia terhadap gaya viskos dalam aliran fluida. Nilai Re yang tinggi mengindikasikan dominasi gaya inersia, yang dapat menyebabkan aliran menjadi turbulen [17]. Selain itu, turbulensi juga berpengaruh pada efisiensi propeller UAV. Desain propeller dengan tambahan winglet dapat membantu mengurangi gangguan aerodinamis dan meningkatkan efisiensi daya dorong, sekaligus mengurangi kebisingan yang dihasilkan selama penerbangan. Pemahaman yang lebih baik tentang pola turbulensi di sekitar UAV dapat digunakan untuk meningkatkan stabilitas, efisiensi aerodinamika, dan akurasi sensor yang digunakan dalam berbagai aplikasi pemantauan lingkungan dan penelitian atmosfer [18].

2.8 Mekanika Material

Mekanika material adalah cabang ilmu teknik yang mempelajari perilaku material ketika dikenai gaya atau beban. Ilmu ini bertujuan untuk memahami bagaimana suatu material merespons tegangan (*stress*), regangan (*strain*), dan deformasi sebagai akibat dari beban mekanis [19]. Pengetahuan tentang mekanika material sangat penting dalam desain dan analisis struktur atau komponen mekanis untuk memastikan keamanan, efisiensi, dan keandalannya.

Dalam mekanika material, sifat-sifat seperti kekuatan tarik, elastisitas, kekuatan luluh, dan kekuatan patah menjadi faktor kunci yang digunakan untuk mengevaluasi kemampuan material. Dua konsep dasar yang sangat penting adalah tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*), yang dijelaskan sebagai berikut:

2.8.1 Tegangan (*Stress*)

Tegangan adalah gaya per satuan luas yang bekerja pada suatu material. Tegangan terjadi ketika suatu gaya diaplikasikan pada material melalui permukaan penampangnya[16]. Besarnya tegangan berbanding lurus dengan gaya yang diberikan, dan berbanding terbalik dengan luas penampang material tersebut. Semakin besar gaya atau semakin kecil luas penampang, maka tegangan yang terjadi pada material akan semakin besar.

Persamaan untuk menghitung tegangan dirumuskan pada persamaan 2.11.[19]

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots \dots \dots (2.11)$$

Di mana:

- σ = Tegangan (N/m² atau Pascal)
- F = Gaya yang diterapkan (N)
- A = Luas penampang material (m²)

Tegangan ini berperan penting dalam menentukan kemampuan material untuk menahan gaya sebelum mengalami deformasi atau kerusakan.

2.8.2 Regangan (*Strain*)

Regangan adalah perubahan bentuk atau dimensi suatu material akibat gaya yang diberikan. Regangan terjadi ketika material mengalami perubahan panjang sebagai respons terhadap tegangan yang bekerja padanya. Hal ini biasanya terjadi karena gaya tarik atau gaya tekan.

Regangan merupakan besaran tanpa dimensi karena didefinisikan sebagai perbandingan antara perubahan panjang (Δx) dengan panjang awal material (x_0).Persamaannya adalah seperti pada rumus 2.12[19].

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x_0} \dots \dots \dots (2.12)$$

Di mana:

- ε = Regangan (tanpa satuan)

- Δx = Perubahan panjang material (m)
- x_0 = Panjang awal material (m)

Semakin besar perubahan panjang suatu material akibat tegangan, maka semakin besar pula regangan yang dihasilkan. Namun, kemampuan material untuk menahan regangan bergantung pada sifat mekaniknya, seperti modulus elastisitas dan kekuatan tarik.

2.9 Center of Gravity (CG)

Center of Gravity (CG) atau pusat gravitasi adalah titik di mana seluruh berat sebuah objek dapat dianggap terkonsentrasi. Dalam sistem mekanik, CG memainkan peran penting dalam menentukan stabilitas dan keseimbangan suatu benda, termasuk Unmanned Aerial Vehicle (UAV). Pada drone, penentuan posisi CG sangat krusial, karena memengaruhi kestabilan penerbangan, efisiensi manuver, serta distribusi gaya aerodinamika dan thrust dari propeller [20].

Dalam sistem koordinat tiga dimensi (x,y,z), posisi CG (x_{cg} , y_{cg} , z_{cg}) suatu UAV dapat dihitung menggunakan rumus:

$$x_{cg} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i}, y_{cg} = \frac{\sum m_i y_i}{\sum m_i}, z_{cg} = \frac{\sum m_i z_i}{\sum m_i} \dots\dots\dots 2.13$$

di mana:

- m_i = massa dari tiap komponen UAV (kg)
- x_i, y_i, z_i = posisi tiap komponen UAV dalam koordinat tertentu (m)

Rumus ini menunjukkan bahwa CG bergantung pada distribusi massa dari setiap komponen UAV, termasuk frame, motor, baterai, dan payload seperti kamera atau sensor [21].

Penempatan baterai, sensor, dan muatan tambahan harus mempertimbangkan posisi CG agar distribusi massa tetap simetris. Jika CG tidak berada di tengah, drone akan mengalami momen yang menyebabkan pergerakan tak diinginkan, seperti pitching (maju-mundur) atau rolling (ke samping). Dalam praktiknya, baterai sering diposisikan lebih dekat ke pusat drone untuk membantu mengontrol CG, sementara

payload seperti kamera atau sensor sering disesuaikan untuk menyeimbangkan distribusi massa .

Dalam pengujian dan simulasi UAV, analisis Computational Fluid Dynamics (CFD) sering digunakan untuk mengevaluasi efek CG terhadap kestabilan penerbangan. Simulasi ini membantu memastikan bahwa distribusi beban tidak menyebabkan turbulensi aerodinamis yang berlebihan, yang dapat mengurangi efisiensi penerbangan. Pemodelan CFD memungkinkan insinyur untuk mengidentifikasi perubahan distribusi tekanan dan efek aerodinamis akibat pergeseran CG, sehingga desain UAV dapat dioptimalkan sebelum produksi [21].

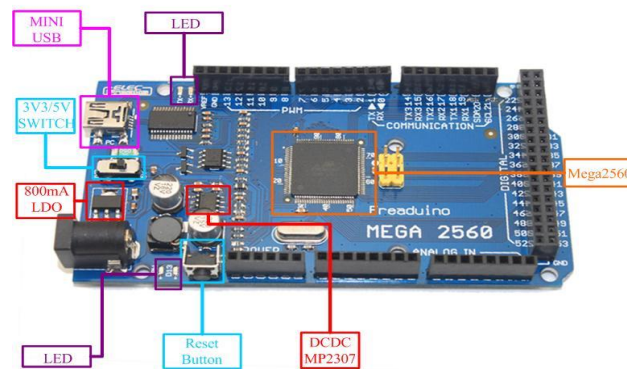
2.10 Komponen Simulasi

Komponen simulasi adalah elemen-elemen penting yang diperlukan untuk mendukung penelitian dan simulasi sistem yang sedang dikembangkan. Komponen-komponen ini mencakup mikrokontroler, sensor, dan sumber daya, yang masing-masing memiliki peran spesifik dalam memastikan keberhasilan simulasi.

2.10.1 Mikrokontroler sebagai Pengatur Sensor

Mikrokontroler berbasis chip ATmega2560 yang sangat populer untuk proyek elektronik, terutama yang membutuhkan kemampuan pemrosesan lebih tinggi dibandingkan model Arduino lainnya seperti Arduino Uno. Mikrokontroler ini memiliki 54 pin digital, 16 input analog, dan 4 port serial UART, sehingga ideal untuk aplikasi dengan banyak input dan output, seperti robotika atau sistem otomatisasi yang kompleks. Dilengkapi dengan memori flash 256 KB (dengan 8 KB digunakan untuk *bootloader*), SRAM 8 KB, dan EEPROM 4 KB, Arduino Mega memiliki kapasitas memori yang cukup besar untuk program yang membutuhkan banyak data. Berjalan pada frekuensi 16 MHz, serta memiliki berat sebesar 37 gram membuat mikrokontroler ini cukup cepat untuk proyek kontrol dan sensor yang memerlukan respons real-time dan mudah untuk dibawa dan diintegrasikan ke dalam berbagai proyek. Arduino Mega 2560 R3 juga kompatibel dengan berbagai shield dan modul eksternal, yang memudahkan integrasi dengan sensor, modul komunikasi, dan perangkat lainnya, serta didukung oleh Arduino IDE

yang memungkinkan pemrograman mudah dalam bahasa C/C++. Selain itu, Mega 2560 R3 memiliki 4 port UART, serta mendukung SPI dan I2C, yang memungkinkan komunikasi dengan perangkat eksternal lainnya seperti sensor dan modul komunikasi[22]. Mikrokontroler ini dapat diberi daya melalui kabel USB atau sumber eksternal seperti baterai dengan tegangan input 7-12V dan memiliki regulator daya internal untuk stabilitas. Dengan banyaknya pin input/output serta kapasitas memori yang besar, kecepatan prosesor, berat yang ringan sebesar 37 gram, dan kemampuan integrasi dengan berbagai modul eksternal, Arduino Mega 2560 R3 menjadi pilihan yang sangat cocok untuk proyek elektronik yang membutuhkan fleksibilitas tinggi, mulai dari robotika hingga sistem kontrol otomatis.



Gambar 2.3 Mikrokontroler Arduino.[23]

Dengan fitur yang dimiliki oleh Arduino, mikrokontroler ini menjadi pilihan yang sangat cocok untuk proyek elektronik yang membutuhkan banyak pin input/output serta kapasitas memori yang besar. Selain itu, kecepatan prosesor dan kemampuan integrasi dengan berbagai modul eksternal menjadikan mikrokontroler ini fleksibel untuk berbagai aplikasi, mulai dari robotika hingga sistem kontrol otomatis. Untuk spesifikasi Mikrokontroler bisa dilihat pada tabel 2.1 berikut :

Tabel 2.1 Spesifikasi Mikrokontroler Arduino Mega 2560 R3

Spesifikasi	Perincian
Mikrokontroler	ATMEGA2560
Voltan operasi	5v
Voltan input	Disyorkan: 7-12V, Had:6-20V
Digital I/O pin	54(15 dengan out[ut PWM)
Pin input analog	16

DC semasa per pin I/O	20 ma
Semasa DC untuk pin 3.3V	50 ma
Memori kilat	256 kb (8kb untuk bootloader)
SRAM	8 kb
Eeprom	4 kb
Kelajuan jam	16 MHz
Led terbina dalam	Pin 13
Dimensi (L x W)	101.52 mm X 53.3 mm
Berat	37 Gram
Suhu operasi	-40° C hingga 85°C.

2.10.2 Sensor CO₂

Dapat dilihat pada Gambar 2.4 adalah sensor infrared CO₂ dengan jangkauan luas efektif hingga 0-50.000 ppm. Sensor ini didasarkan pada teknologi *Non-Diversity Infrared* (NDIR) dengan selektivitas yang sangat baik terhadap *oxygen-free dependency*. Sensor infrared CO₂ juga terintegrasi dengan kompensasi suhu dan mendukung UART sebagai sistem komunikasi. Salah satu manfaat utama dari Sensor infrared CO₂ adalah kompatibilitasnya dengan segala jenis mikrokontroler dengan *port* UART seperti Arduino, *Raspberry pi* dan mikrokontroler lainnya. Selain itu Sensor *infrared* CO₂ merupakan sensor dengan kinerja tinggi yang menggabungkan deteksi penyerapan gas melalui infrared dengan desain sirkuit yang canggih. Karakteristik yang dimiliki Sensor ini adalah memiliki deteksi dengan jangkauan yang luas, sensitivitas yang tinggi, resolusi tinggi, daya konsumsi yang rendah, respon yang cepat, *anti-water vapor interference*, stabilitas yang tinggi dan long life performance stabilitas tinggi, dan kinerja tahan lama (*long-life performance*). Sensor ini memiliki berat sebesar 42 gram, yang membuatnya ringan dan mudah diintegrasikan ke berbagai proyek elektronik dan sistem pemantauan emisi karbon. [24].



Gambar 2.4 Sensor CO₂[25]

Pada Gambar 2.4 sensor CO₂ Dengan fitur-fitur yang dimilikinya, sensor ini menjadi solusi ideal untuk aplikasi yang membutuhkan pengukuran CO₂ yang akurat dan handal. Teknologi NDIR yang digunakan memastikan bahwa pengukuran tidak terpengaruh oleh uap air atau gangguan lingkungan lainnya, sehingga cocok untuk digunakan di berbagai kondisi operasional. Spesifikasi sensor tersebut bisa dilihat pada tabel 2.2 berikut :

Tabel 2.2 Spesifikasi sensor CO₂.

Spesifikasi	Perincian
Deteksi gas	Karbon dioksida (CO ₂)
Tegangan Operasi	4,5 ~ 5,5V DC
Arus Rata-rata	<85 mA
Sinyal keluaran	UART
Rentang pengukuran	0 ~ 50000ppm
akurasi	±(50ppm + 5% dari pembacaan)
Waktu pemanasan	3 menit
Waktu Respon	T90 < 30 detik
Suhu operasi	0 ~ 50°C
Kelembapan operasi	0 ~ 95% RH(tanpa kondensasi)
Dimensi papan	21 * 27,11mm / 0,83 * 1,06 inci
Berat	42 gram

2.10.3 Sensor suhu dan kelembaban

Pada Gambar 2.5 Sensor suhu dan kelembaban merupakan sensor terbaik di kelasnya dalam seri SHT3x dari Sensirion. Sensor suhu dan kelembaban menawarkan kestabilan pengukuran yang sangat akurat dan tahan lama. Desain unik sensor ini memastikan thermal coupling yang optimal, meminimalkan pengaruh panas dari sumber potensial di papan utama. Sensor ini dilengkapi dengan membran yang didedikasikan untuk melindungi sensor dari cairan dan debu sesuai standar IP67, tanpa memengaruhi fungsi sensor. Dengan perlindungan ini, sensor suhu dan kelembaban dapat diandalkan untuk digunakan dalam kondisi lingkungan yang keras, seperti paparan semprotan air atau debu tinggi [26]. Sensor suhu dan kelembaban ini memiliki berat sebesar 0,8 gram, menjadikannya ringan dan mudah diintegrasikan dengan berbagai aplikasi. Dilengkapi dengan antarmuka I2C, sensor ini mendukung integrasi sederhana dengan mikrokontroler serta memungkinkan laju pengambilan data yang cepat. Keunggulan utama lainnya adalah desain probe

yang dapat dilepas, memberikan fleksibilitas pemasangan dan mempermudah proses kalibrasi serta perawatan sensor. Selain itu, lapisan pelindung khusus pada elemen sensornya meningkatkan ketahanan terhadap kelembapan dan kontaminasi, sehingga memberikan performa yang andal meskipun dalam kondisi lingkungan yang menantang.



Gambar 2.5 Sensor suhu dan kelembaban[27]

Dapat dilihat pada Gambar 2.5 untuk memberikan ilustrasi lebih lanjut mengenai desain, struktur, dan dimensi sensor suhu dan kelembaban. Dengan fitur-fitur yang ditawarkan, sensor ini menjadi pilihan unggulan untuk aplikasi pemantauan lingkungan yang membutuhkan akurasi tinggi dan keandalan dalam berbagai kondisi.

Spesifikasi sensor tersebut bisa dilihat pada tabel berikut :

Table 2.3 Sensor suhu dan Kelembaban

Spesifikasi	Keterangan
Supply Voltage	3,3 – 5V
Supply Current	1500 mikro ampere
Operating Temperature Range	-40 – 105 °C
Heater Power	3,6 – 33 mW
Max voltage on pins (pin 1 (SCL); pin 4 (SDA)	-0.3 to 6 V

2.10.4 Sensor gas CH₄

Pada gambar 2.6 Sensor CH₄ adalah sensor gas yang dirancang khusus untuk mendeteksi konsentrasi gas metana (CH₄) di udara, sering digunakan dalam pemantauan gas untuk aplikasi keamanan lingkungan seperti di tambang atau industri. Sensor ini bekerja menggunakan prinsip katalitik, di mana elemen katalis dalam sensor bereaksi dengan gas metana, menghasilkan perubahan panas yang

diubah menjadi sinyal listrik [28]. Sensor gas inframerah mini ini dikembangkan dengan integrasi yang erat antara teknologi deteksi gas inframerah, micro machine workout, dan desain sirkuit yang unggul. Modul ini memiliki berat sebesar 35 gram, sehingga ringan dan mudah diintegrasikan ke berbagai sistem pemantauan emisi gas. Dengan desainnya yang kompak dan kinerjanya yang handal, sensor ini cocok digunakan dalam aplikasi yang memerlukan pengukuran gas metana secara akurat.



Gambar 2.6 Sensor CH4 [29]

Spesifikasi sensor CH4 tersebut bisa dilihat pada tabel 2.4 berikut :

Tabel 2.4 spesifikasi sensor CH4.

Working Voltage	3,6 – 5V
Average Current	< 85mA
Detection Range	0 – 10 %vol
Output	UART (3 Volt)
Warm-up Time	3 min
Interface Level	3 Volt
Response Time	T90 < 30s
Size	20 x 22.4 mm
Weight	35 gram

2.10.5 Sensor tekanan

Pada Gambar 2.7 sensor tekanan ini menunjukkan konsumsi daya yang lebih rendah, resolusi yang lebih tinggi, dan kecepatan pengambilan sample yang lebih tinggi. Tekanan barometrik biasanya digunakan untuk mengukur tekanan dan suhu barometrik[30]. Tapi selain itu, kita juga menggunakan sensor untuk mengukur

ketinggian dan tinggi lantai relative karena ada hubungan tertentu antara ketinggian dan tekanan barometric. Sensor tekanan didasarkan pada teknologi sensor tekanan resistif *Piezo Bosch* yang matang menampilkan akurasi tinggi serta konsumsi daya yang rendah dan ketahanan Electromagnetic compatibility (EMC) yang tinggi. Sensor ini mampu mengukur tekanan dalam rentang 300 hingga 1250 hPa dengan akurasi ± 0.5 hPa dan suhu akurasi mutlak $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ untuk kisaran suhu antara -40°C hingga 80°C . Sensor ini memiliki berat sebesar 1,2 gram, yang menjadikannya sangat ringan dan ideal untuk integrasi ke dalam perangkat yang membutuhkan portabilitas tinggi. Dengan keunggulan seperti konsumsi daya rendah dan akurasi tinggi, sensor ini sangat cocok untuk aplikasi seperti pemantauan tekanan atmosfer, pengukuran ketinggian, dan aplikasi yang memerlukan pengukuran tekanan barometrik secara akurat.



Gambar 2.7 Sensor tekanan[31]

Spesifikasi sensor tekanan tersebut bisa dilihat pada tabel 2.5 berikut :

Tabel 2.5 Spesifikasi sensor tekanan

Operating Voltage	3,3 – 5V
Operating Current	0,5mA
Operating Range	300 – 1250 hPa
Absolute Accuracy	+ - 50 pa
Operating Temperature	-40°C – 80 °C
Temperature Coefficient Offset	+ -0.75 Pa/K
Relative Accuracy	+ - 8 pa
Interface	Gravity-I2C 4pin
Product dimension	21.6mm x 16.6mm x 3.0 mm
Product weight	1.2 gram

2.10.6 Baterai

Pada Gambar 2.8 merupakan baterai isi ulang yang dikenal karena densitas energinya yang tinggi, siklus pengisian yang panjang, dan efisiensi yang baik. Baterai ini menghasilkan daya yang stabil dan ringan, menjadikannya pilihan populer untuk perangkat portabel, kendaraan listrik, dan berbagai aplikasi elektronik [32].

Baterai yang dipakai memiliki kapasitas 1200 - 3600 mAh, baterai ini memberikan tegangan nominal total sekitar 3,7 V. Kapasitas 1200 - 3600 mAh menunjukkan bahwa baterai dapat menyediakan arus 1200 mA -3600 mAh selama satu jam atau arus yang lebih kecil untuk durasi lebih lama, tergantung pada kebutuhan daya perangkat. Baterai ini cocok untuk mendukung proyek seperti UAV atau drone karena mampu menyediakan daya yang stabil dan cukup untuk mengoperasikan berbagai sensor dan komponen elektronik dalam durasi yang memadai.

Baterai ini memiliki berat sebesar 30 sampai 55 gram, yang membuatnya cukup ringan untuk diintegrasikan ke dalam perangkat portabel seperti drone atau robot. Dengan karakteristik seperti ini, baterai ini menjadi salah satu komponen penting dalam sistem yang membutuhkan sumber daya yang ringan, stabil, dan dapat diandalkan dalam jangka waktu yang lama



Gambar 2.8 Baterai Li-Ion [33]

Spesifikasi baterai tersebut bisa dilihat pada tabel berikut :

Tabel 2. 6 spesifikasi baterai.

Battery Type	Li – Ion
Model No	18650
Voltage	3,7 V
Capacity	1200 – 3600 mAh
Operating Voltage	2,5 – 4,2 V
Charge Density	1,5 – 11,5 Wh
Charging Voltage	4,2 – 5 V
Self Discharge	6 – 10 %
Size/dimension	18 x 65 mm
Weight	30 – 55 gram

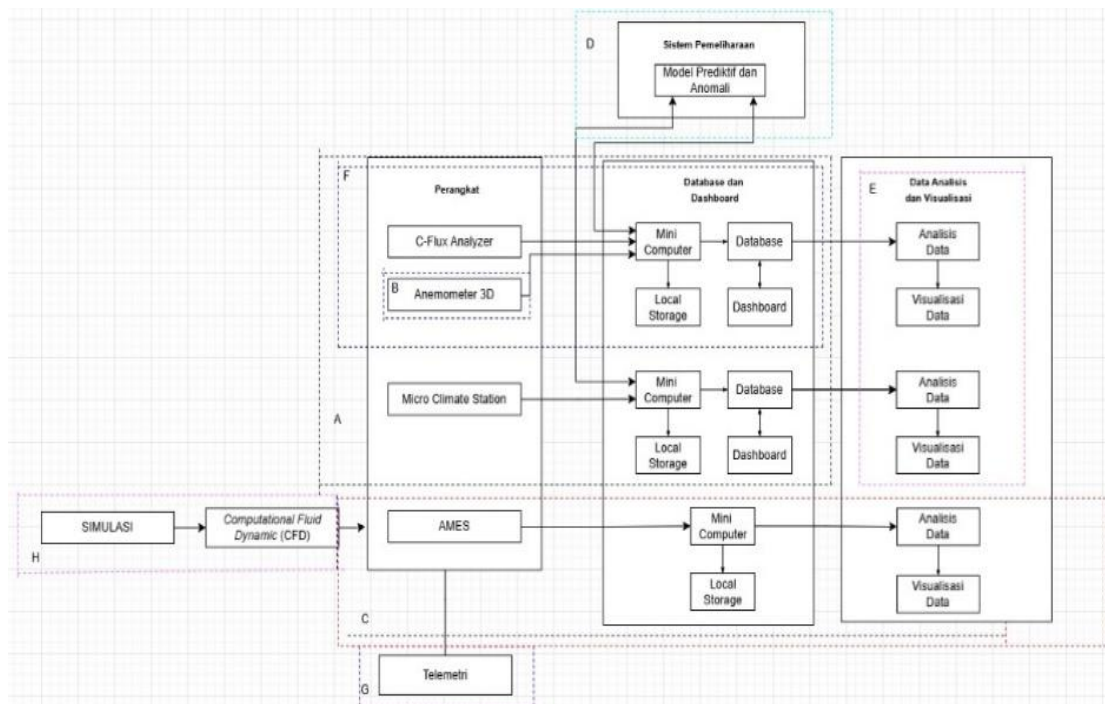
BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Desember 2024 – Mei 2025 di Laboratorium Terpadu Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro Universitas Lampung.

3.2 Capstone Project



Gambar 3.1 Diagram Project Capstone

Dapat dilihat pada Gambar 3.1 merupakan diagram yang menggambarkan keseluruhan integrasi sistem *Eddy Covariance System* (ECS), yang terdiri dari beberapa komponen dengan masing-masing tanggung jawab yang didefinisikan

secara jelas. Garis hitam pada bagian A menunjukkan keseluruhan sistem ECS yang mencakup perangkat pengukuran, penyimpanan data, hingga analisis dan visualisasi. Bagian ini dikelola oleh rekan penulis yaitu Aldi, yang memastikan integrasi semua komponen berjalan dengan baik. Garis biru pada bagian B merepresentasikan modul *3D Anemometer* yang dirancang oleh Rizky. Alat ini berfungsi untuk mendeteksi arah dan kecepatan angin dalam tiga dimensi, menjadi bagian penting dalam pengukuran fluks karbon.

Bagian C, yang diwakili oleh garis oranye, adalah *Aerial Measurement Eddy Covariance System* (AMES) yang dibuat oleh Dwika. Modul ini berfungsi sebagai penghubung antara perangkat pengukuran dan simulasi CFD, memproses data mentah yang dihasilkan dari lapangan. Sementara itu, garis hijau pada bagian D merepresentasikan Sistem Pemeliharaan, yang dirancang oleh Afni untuk mengembangkan model prediktif dan mendeteksi anomali, sehingga kinerja ECS dapat tetap optimal.

Garis merah muda pada bagian E menunjukkan modul Analisis dan Visualisasi Data, yang bertanggung jawab untuk mengolah data dan menyajikannya dalam bentuk yang informatif dan mudah dipahami. Modul ini dikembangkan oleh Sofya. Selanjutnya, garis ungu pada bagian F menunjukkan kontribusi Wisnu dalam merancang motherboard untuk *C-Flux Analyzer* dan *3D Anemometer*, memastikan perangkat keras dapat beroperasi dengan efisien.

Pada bagian G, garis kuning merepresentasikan sistem Telemetri yang dirancang oleh Ramadani. Sistem ini memungkinkan pengiriman data secara real-time dari perangkat pengukuran ke *server* atau *dashboard*. Terakhir, garis magenta pada bagian H menggambarkan Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang dikembangkan oleh Penulis. Simulasi ini digunakan untuk memodelkan distribusi karbon di udara, memberikan data prediktif yang mendukung pengukuran lapangan.

3.3 Komponen dan Perangkat Lunak

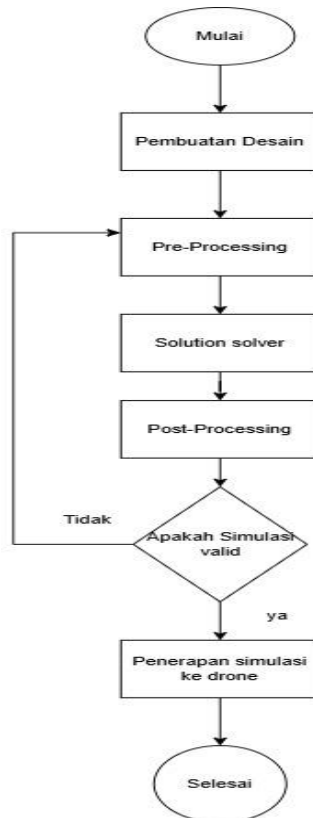
Dalam penelitian tugas akhir ini, terdapat beberapa komponen dan perangkat lunak yang digunakan seperti pada tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Komponen dan Perangkat Lunak pada Perangkat

No.	Nama Komponen dan Perangkat Lunak	Keterangan Penggunaan
1.	DJI S800 Evo (Hanya Frame)	Sebagai wahana yang akan membawa sensor
2.	Arduino Mega 2350 R3	Sebagai mikrokontroller untuk pengambilan, pengolahan, dan penyimpanan data.
3.	BMP388	Sebagai sensor pengukur tekanan udara.
4.	SEN0220	Sebagai sensor gas karbon dioksida
5.	3D Printer	Sebagai alat untuk membuat <i>mounting</i> dan <i>Plate</i> sensor
6.	Autodesk Inventor	Sebagai software yang digunakan untuk mendesain
7.	SolidWorks	Sebagai software yang digunakan untuk simulasi <i>Computational Fluid Dynamics (CFD)</i>
8.	Grabcad	Sebagai platform komunitas yang menyediakan dan mendukung desain Teknik dan kolaborasi
9	SHT85	Sebagai sensor kelembapan dan suhu udara
10	<i>Buck boost Converter</i>	Sebagai komponen untuk menurunkan dan menaikkan tegangan
11	Battery Li-Ion	Sebagai komponen power supply
12	Laptop	Sebagai perangkat utama untuk pemrograman, pengolahan data, desain 3D, serta analisis dan simulasi.
13	3D Print	Sebagai pembuatan komponen pendukung sensor dan wahana.
14	Filament	Sebagai bahan baku dalam proses pencetakan 3D
15	<i>Carbon tube</i>	Sebagai material struktural ringan dan kuat

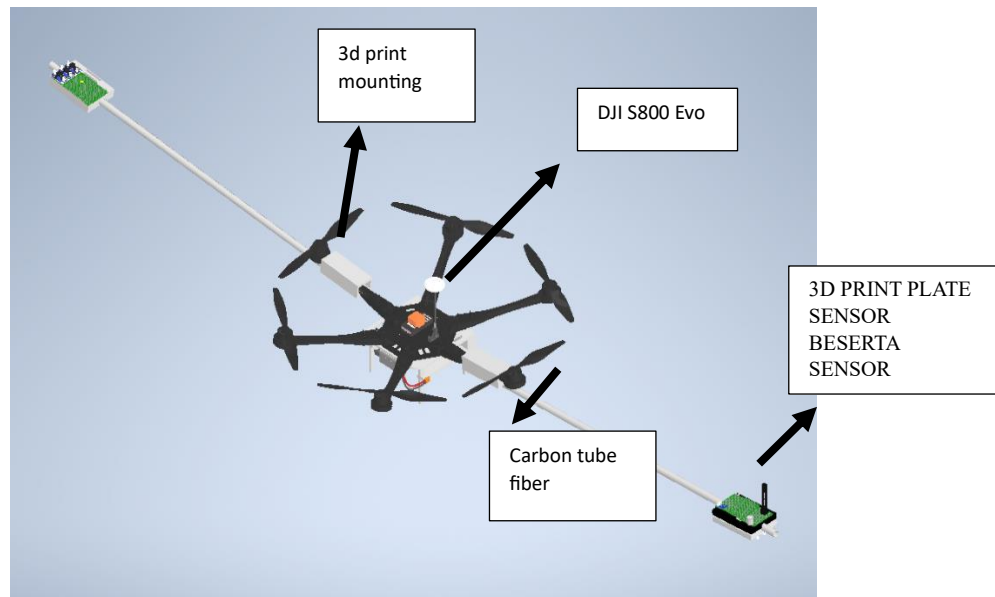
3.4 Metodologi

Pada penelitian ini, metode yang digunakan adalah dengan melakukan simulasi aliran menggunakan *software Solidworks*. Metode penelitian pada simulasi tersebut terdiri dari tiga tahap utama: tahap *pre-processing*, tahap *solution solver*, dan tahap *post-processing*, yang akan dijelaskan secara detail pada diagram alir gambar 3.1. [34]



Gambar 3.2 Diagram alir metodologi penelitian

Pada gambar 3.2 penelitian ini simulasi perancangan sistem dilakukan menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor dan SolidWorks. hasil dari pengujian yang diberikan Simulasi ini bertujuan untuk menganalisis aspek aerodinamika dan kestabilan *drone* saat membawa beban berupa sensor emisi karbon. Desain juga dibuat semirip mungkin dengan komponen yang akan dipasang pada *Drone* Dji s800 Evo yang akan mendapatkan sumber daya dari *battery* yang masing-masing memiliki sistem independent. Pembacaan sensor yang akan dimulai dengan mikrokontroler arduino mega 2350 yang memberikan sensir untuk mendeteksi lingkungan sekitar.



Gambar 3.3 Perancangan Desain *Aerial Measurement Eddy System* (AMES)

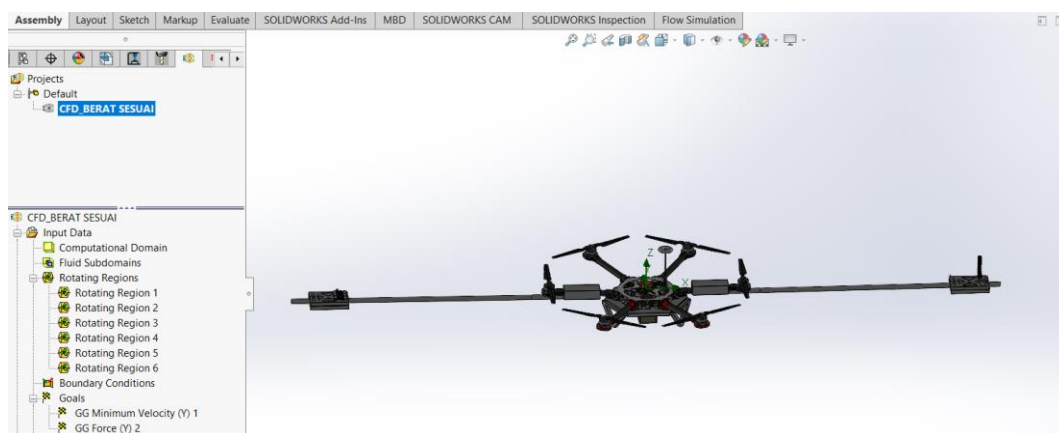
Pada gambar 3.3 Desain dari wahana dirancang sensor yang digunakan akan diletakan di bagian kanan kiri arm pada jarak 1 meter dari ujung *Motor drone* dan akan dibantu menggunakan pipa *Carbon Fiber*, yang nantinya akan dihubungkan menggunakan mounting berbahan filament ke lengan *arm motor drone*. Pada *plate sensor*; sensor akan ditempatkan diatas pipa carbon fiber yang terpasang pada lengan *arm motor drone*. Desain struktur diawali dengan mengukur panjang *arm* pada *drone* untuk menentukan ukuran *mounting* yang akan digunakan. Selanjutnya, dilakukan perancangan mounting untuk membantu *carbon tube*, yang akan mendukung dudukan sensor berbahan *fiber*. Struktur dan posisi sensor juga dirancang dengan cermat untuk memastikan proses sampling oleh sensor dapat dilakukan dengan akurat, sekaligus menjaga kestabilan wahana selama terbang. Berat *drone* tanpa beban adalah 2,91 kg, berat baterai Li-Ion seberat 1,35 kg, baterai 4S berat 300 gram, serta total berat beberapa sensor yang terdiri dari Arduino mega, sensor CO₂, sensor CH₄, sensor SHT85, dan sensor BMP388 dengan berat total 86 gram. Selain itu, berat pipa carbon fiber 2 batang yang digunakan untuk menompang sensor seberat 250 gram. Plate sensor yang dicetak menggunakan 3D printer sebanyak 2 buah, dengan berat 135 gram, serta landing gear 3D print seberat 193,5 gram. Dengan demikian total berat keseluruhan lengkap dengan semua komponen tambahan adalah 5,45kg.

3.4.1 Tahap *Pre-Processing*

Langkah selanjutnya dalam penelitian yang akan dilakukan yaitu tahap *pre-processing* yang terdiri dari mempersiapkan data awal dan parameter yang dibutuhkan untuk simulasi, menyiapkan model yang akan digunakan dalam simulasi, melakukan *meshing* pada model simulasi, menentukan bahan dan model dalam simulasi, serta mendefinisikan kondisi batas pada model simulasi. Berikut adalah penjelasan dari tahapan dari *pre-processing* yang akan dilakukan [35-36].

3.4.1.1 Menyiapkan model simulasi alat

Pada tahap ini, model CAD dari drone digunakan untuk melakukan verifikasi sebelum masuk ke tahap simulasi. Model ini dirancang dengan mempertimbangkan aspek *aerodinamika* dan performa terbang *drone*, sehingga dapat digunakan untuk menganalisis berbagai kondisi yang mungkin terjadi saat *drone* beroperasi di udara.

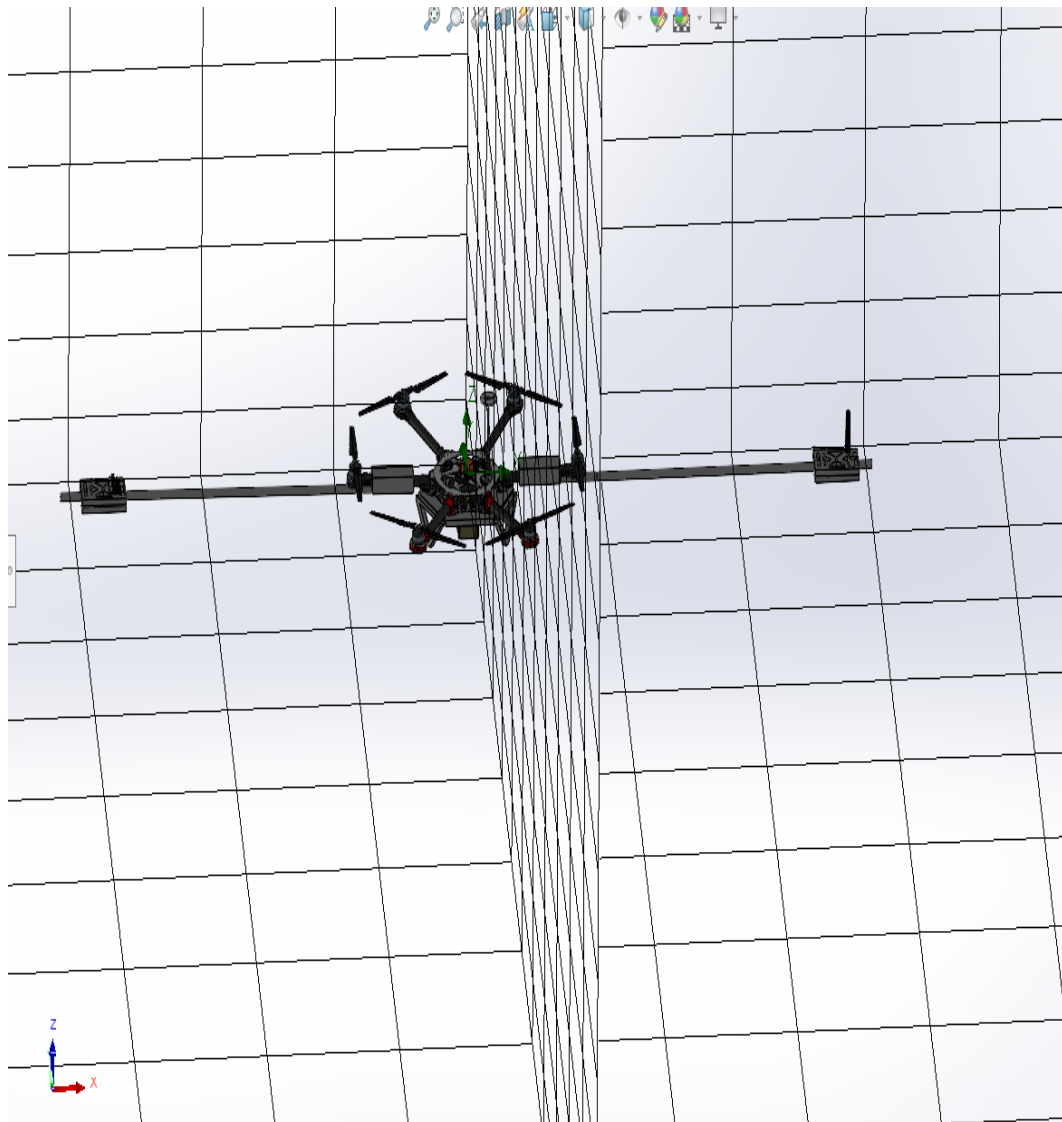


Gambar 3.4 Modifikasi Frame DJI S800 EVO

Pada gambar 3.4 menampilkan Modifikasi Frame DJI S800 EVO yang akan digunakan dalam simulasi. Proses simulasi ini bertujuan untuk mengevaluasi bagaimana drone merespons faktor eksternal seperti turbulensi udara, tekanan angin, dan distribusi gaya saat terbang. Dengan menggunakan perangkat lunak simulasi Solidwork, setiap komponen *drone* dapat dianalisis secara mendalam, termasuk bagaimana propeller menghasilkan daya angkat dan bagaimana distribusi beban terjadi pada rangka drone. Melalui simulasi ini, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih baik mengenai stabilitas dan efisiensi aerodinamika drone sebelum dilakukan pengujian fisik..

3.4.1.2 Meshing

Setelah melakukan verifikasi model CAD, *software* Solidwork secara otomatis akan membuat volume fluida dengan mendefinisikan *computational domain* dari model. Setelah itu akan dilakukan proses *meshing* pada domain fluida model yang telah dibuat untuk menghasilkan simulasi yang mendekati keadaan yang sebenarnya.



Gambar 3.5 Meshing pada Solidwork

3.4.1.3 Setting Boundary Condition

Menentukan jenis analisis, fluida material, dan model yang akan dimasukkan dalam simulasi. Berikut adalah beberapa parameter yang harus ditentukan dalam melakukan setting *boundary condition*: (a) Tipe aliran fluida yang akan digunakan, (b) Jenis fluida yang akan digunakan dalam simulasi, (c) Jenis aliran, cara menentukan jenis aliran yang digunakan adalah melalui perhitungan bilangan *reynolds* yang dapat dihitung menggunakan rumus pada persamaan (3.1), dan (d) penentuan *inlet, outlet*, serta *rotation region*.

$$Re = \frac{\rho \cdot V_s \cdot D}{\mu} \dots\dots\dots(3.1)$$

Keterangan :

1. Re: Bilangan Reynolds menentukan jenis aliran fluida
2. ρ : Massa jenis fluida (kg/m^3)
3. V_s : Kecepatan aliran fluida (m/s)
4. D: Diameter karakteristik (contohnya diameter pipa atau benda) (m).
5. μ : Viskositas dinamis fluida ($\text{Pa}\cdot\text{s}$ atau $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$)

Pada lubang *inlet* aliran yang berfungsi sebagai tempat masuknya aliran udara yang akan dimasukkan didapatkan dari hasil perhitungan persamaan Bernoulli yang ditunjukkan pada persamaan (3.2)[36].

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \dots\dots\dots(3.2)$$

Keterangan :

1. p_1, p_2 : Tekanan fluida pada titik 1 dan titik 2 (Pa).
2. ρ : Massa jenis fluida (kg/m^3).
3. g: Percepatan gravitasi (9.81 m/s^2).
4. v_1, v_2 : Kecepatan fluida pada titik 1 dan titik 2 (m/s).
5. z_1, z_2 : Ketinggian pada titik 1 dan titik 2 di atas referensi (m).

Selain itu, ditentukan juga intensitas turbulen menggunakan Persamaan(3.3)[37].

$$I_t = \frac{0,16}{Re^{1/8}} 100\% \dots\dots\dots(3.3)$$

Keterangan :

1. I_t : Intensitas turbulensi (dalam persentase, %).
2. Re: Bilangan Reynolds, yang menentukan jenis aliran fluida (laminar atau turbulen).

3.4.2 Tahap Solution Solver

Secara umum, hidrodinamika dalam aliran fluida dapat dinyatakan dalam persamaan kontinuitas dan persamaan aliran Navier-Stokes, yang diperoleh dari kontinuitas dan persamaan kekekalan momentum[38]. *Solution solver* ini akan memecahkan n persamaan Navier-Stokes dan persamaan-persamaan terkait untuk memodelkan aliran fluida dan interaksi dengan geometri turbin. Solusi numerik akan ditemukan melalui iterasi dan pemecahan persamaan yang kompleks. Pada tahap ini, juga dilakukan pengaturan parameter simulasi, seperti kecepatan iterasi, konvergensi, atau model turbulensi yang akan digunakan. Tingkat keakuratan hasilnya dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti kondisi batas yang telah ditetapkan, hasil penggabungan elemen mesh, dan juga kesalahan numerik yang mungkin terjadi.

3.4.3 Tahap Post-Processing

Setelah running selesai, dilakukan tahap post-processing yang meliputi analisis hasil simulasi yang telah dilakukan. Untuk menghitung efisiensi daya mekanis yang dihasilkan dari proses simulasi digunakan Persamaan (3.4).

$$\eta_t = \frac{PM}{PH} \times 100\% \dots\dots\dots(3.4)$$

1. **η t**: Efisiensi termal (dalam persentase, %).
2. **PM**: Daya mekanis keluaran (Output Power), biasanya dalam satuan watt (W).
3. **PH**: Daya panas masukan (Input Power), biasanya dalam satuan watt (W).

3.5 Simulasi

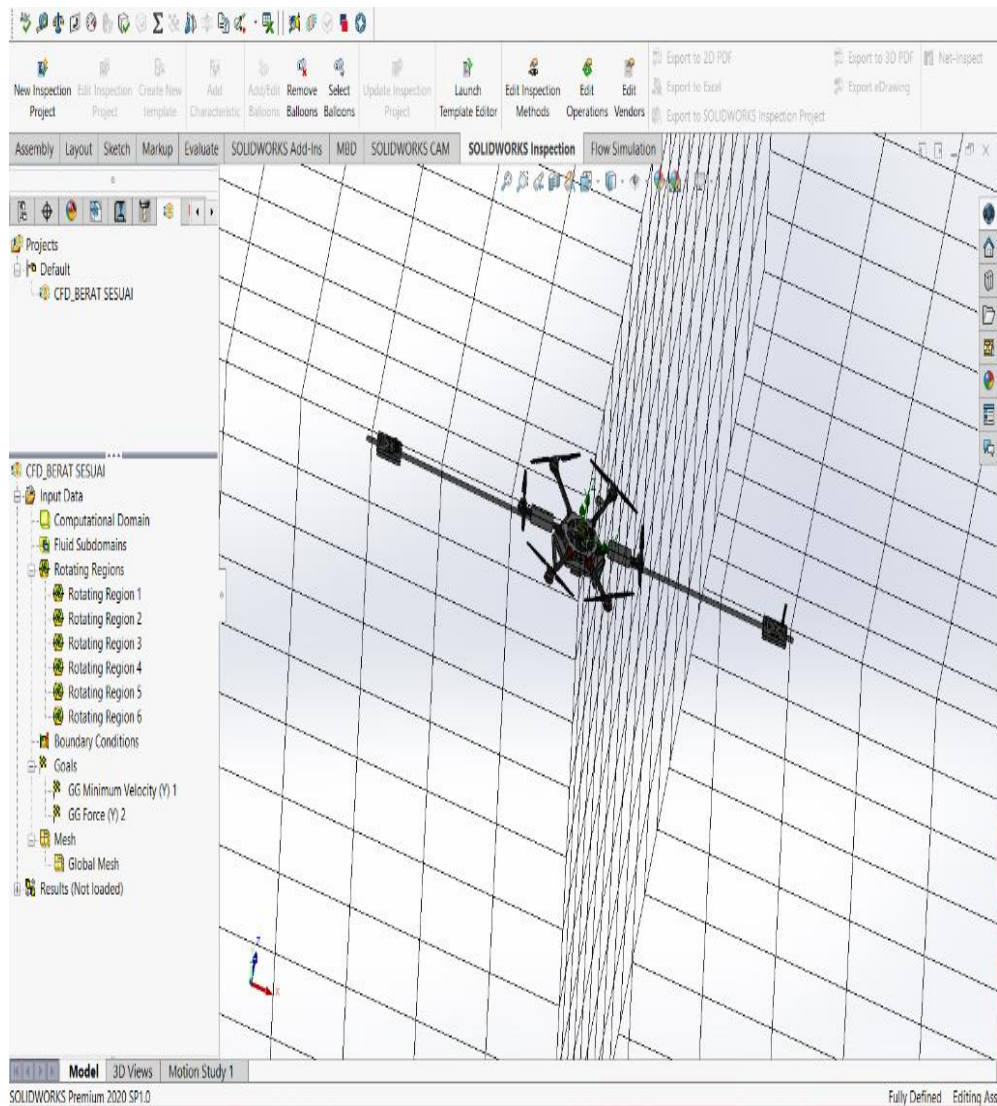
Simulasi akan dilakukan sesuai dengan metode yang telah direncanakan sebelumnya, yang terdiri dari tiga tahap yaitu pre-processing, solution solver, dan post-processing. Tabel 1 menunjukkan data *setting parameter* yang akan digunakan pada simulasi.

Tabel 3.2 Setting Parameter [39]

No	Parameter	
1	Setting unit sistem	SI (m-kg-s)
2	Analysis type	External
3	Default fluid	Air (gases)
4	Initial & ambient conditions	Pressure : 101325 Pa ; Temperature : 293.2 K
5	Kecepatan putaran motor	Divariasikan dimulai dari 400 rpm hingga 10000 rpm

Metode yang digunakan pada simulasi ini adalah menggunakan metode rotating frame sehingga nilai kecepatan putaran motor akan dimasukkan secara variasi dimulai dari 400 rpm hingga 10000 rpm untuk menentukan pada kecepatan putaran berapa motor menghasilkan daya maksimum.

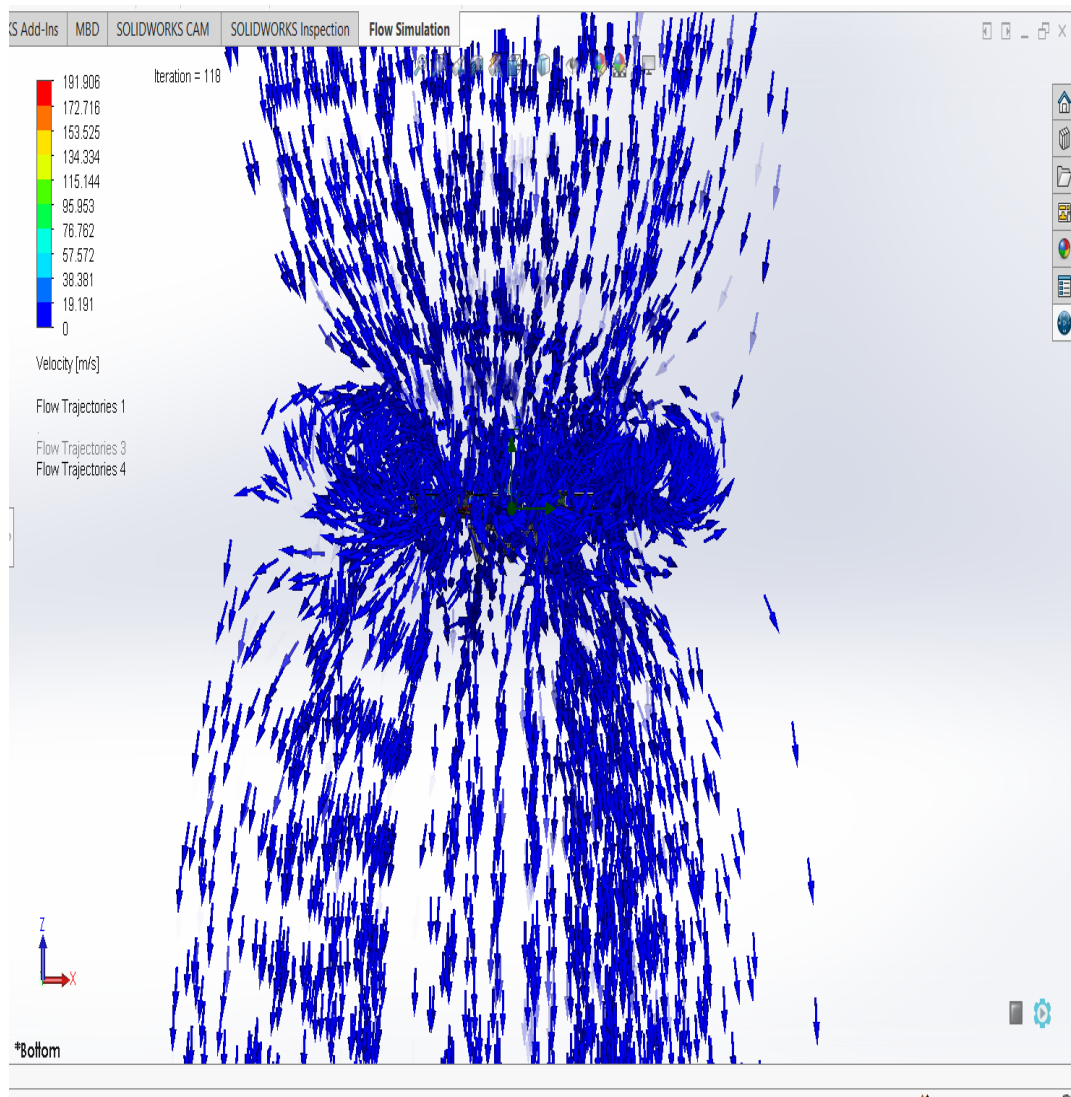
Selanjutnya dilakukan pembuatan *meshing* pada domain fluida yang akan dilakukan simulasi seperti gambar 3.6



Gambar 3.6 Hasil meshing pada Flow simulation

Fungsi *Meshing* dalam *flow simulation* adalah untuk memungkinkan *diskritisasi domain*, meningkatkan akurasi simulasi dan efisien.

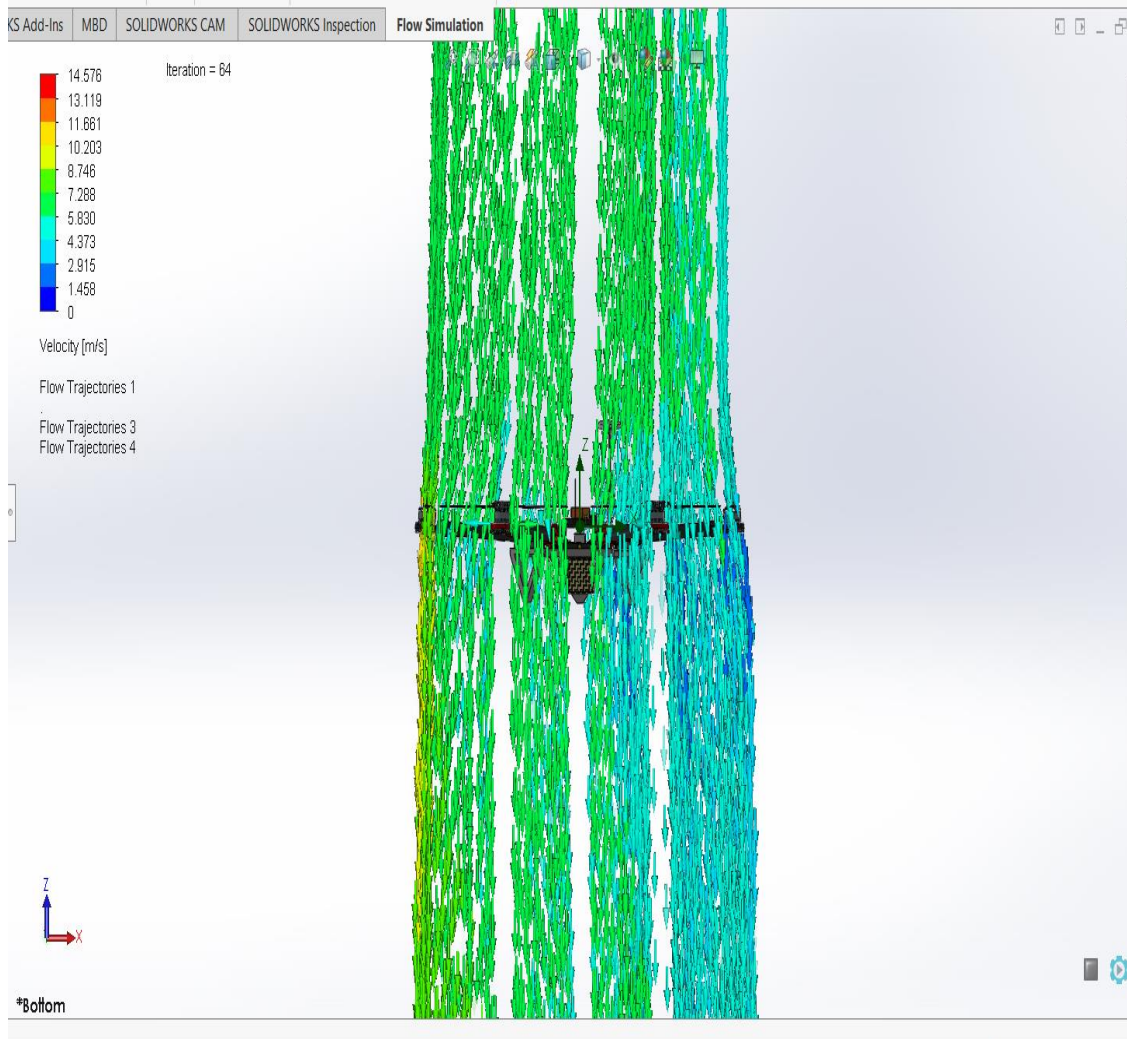
Pada Gambar 3.7 menunjukan hasil simulasi awal tanpa tambahan komponen apapun. Dapat dilihat hasil menampilkan pola turbulensi di daerah drone yang sangat tidak memungkinkan untuk menaruh sensor di bagian bagian pada drone.



Gambar 3.7 Hasil Simulasi Solidwork Tanpa Payload

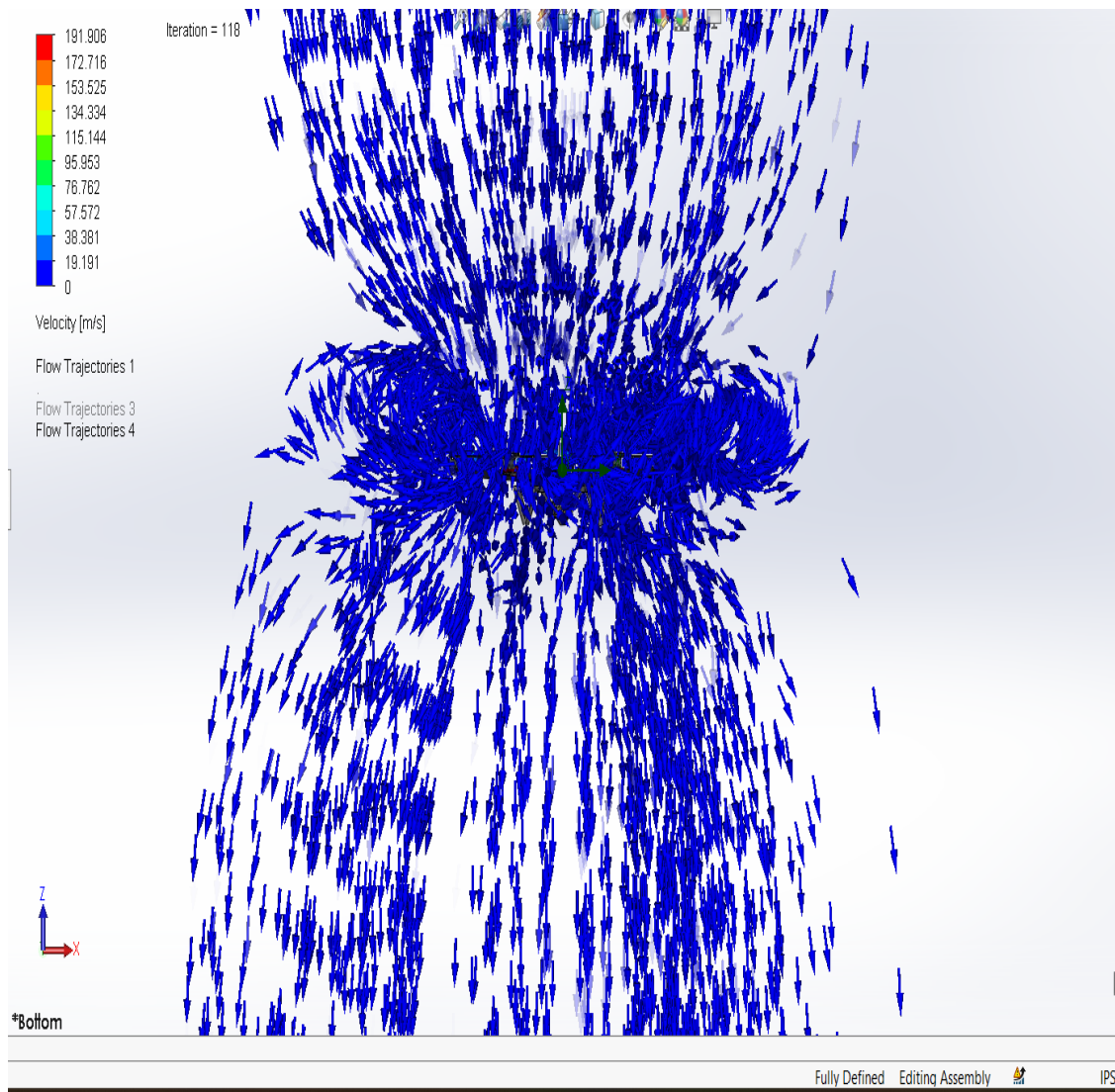
Pada Gambar 3.7 menunjukkan hasil simulasi awal menggunakan tambahan payload. Dapat dilihat hasil simulasi menampilkan tekanan udara dengan berbagai warna biru tua sampai dengan warna merah Dimana warna biru tua menunjukkan bahwa kecepatan fluida itu rendah, sedangkan warna kecepatan tinggi atau maksimal yang dapat dicapai.

Langkah selanjutnya adalah melakukan beberapa simulasi dengan kecepatan motor yang berbeda pada simulasi tanpa payload.



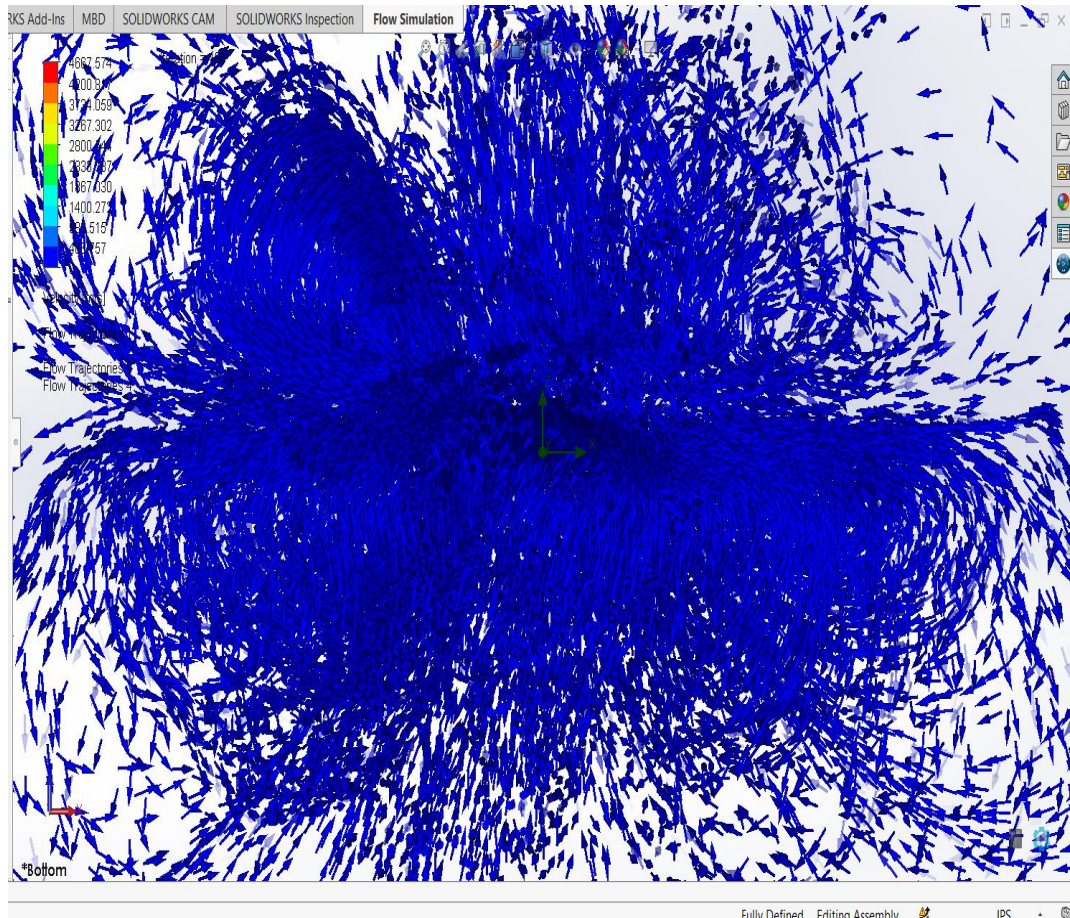
Gambar 3.8 keadaan Simulasi Turbulensi tanpa payload saat motor berada dikecepatan 400RPM

Pada gambar 3.8 menunjukkan hasil simulasi aliran udara pada kecepatan 400 RPM. Terlihat bahwa aliran masih belum stabil dan membentuk banyak area turbulen di sekitar plate sensor. Warna trayektori menggambarkan variasi kecepatan, dengan nilai maksimum mencapai 14.576 m/s. Kondisi ini mencerminkan tahap awal pergerakan drone, di mana turbulensi dapat memengaruhi pembacaan sensor. Oleh karena itu, diperlukan penyesuaian posisi atau perlindungan tambahan agar sensor tetap bekerja secara akurat



Gambar 3.9 keadaan Simulasi Turbulensi tanpa payload saat motor berada dikecepatan 3000 RPM

Gambar 3.9 memperlihatkan hasil simulasi aliran udara pada kecepatan 3000 RPM. Terlihat bahwa aliran udara membentuk pola yang sangat kompleks dan padat, Vektor arah aliran menunjukkan adanya distribusi turbulensi yang kuat di sekitar rotor dan plate sensor. Kondisi ini menandakan fase percepatan drone, di mana tekanan dan kecepatan udara meningkat drastis. Akibatnya, gangguan aliran di sekitar sensor juga lebih besar, sehingga diperlukan strategi perlindungan atau penempatan sensor yang lebih optimal untuk menjaga akurasi pengukuran.

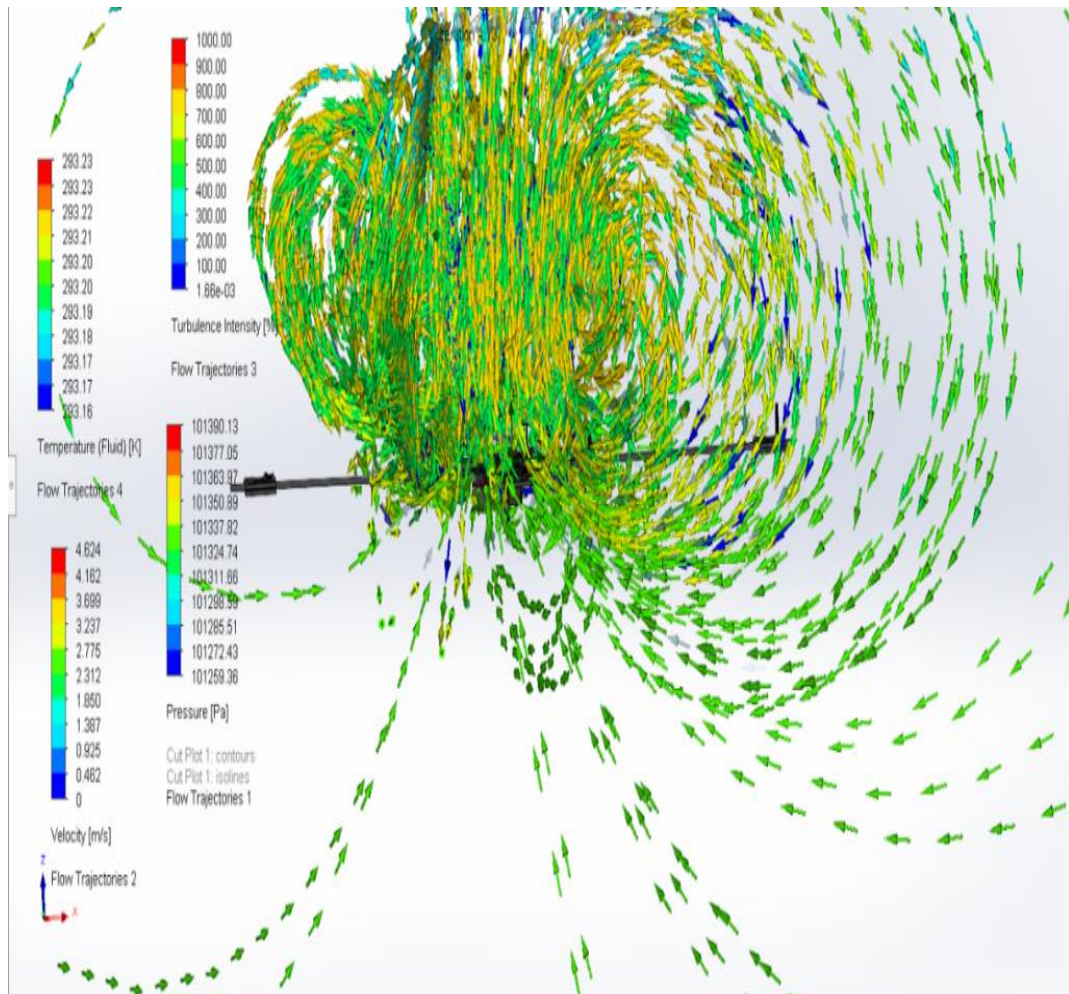


Gambar 3.10 keadaan Simulasi Turbulensi tanpa payload saat motor berada dikecepatan 10000 RPM

Pada gambar 3.10 keadaan simulasi Turbulensi menunjukkan hasil simulasi aliran udara pada kecepatan 10000 RPM. Pada kecepatan ini, aliran udara terlihat sangat padat dan menyebar ke segala arah, dengan vektor-vektor yang menunjukkan pola turbulensi kuat dan kompleks. mengindikasikan adanya akselerasi ekstrem di sekitar baling-baling. Kondisi ini menciptakan zona tekanan tinggi dan gangguan aliran yang signifikan di sekitar sensor, sehingga dapat memengaruhi akurasi pembacaan data. Oleh karena itu, pada kondisi ekstrem seperti ini, penempatan sensor harus benar-benar diperhitungkan agar tetap stabil dan akurat dalam melakukan pengukuran.

Berdasarkan hasil simulasi aliran udara pada beberapa kecepatan berbeda, diketahui bahwa semakin tinggi kecepatan rotasi motor, semakin kompleks dan kuat pola turbulensi yang terbentuk di sekitar drone. Pada 400 RPM, aliran belum stabil dan

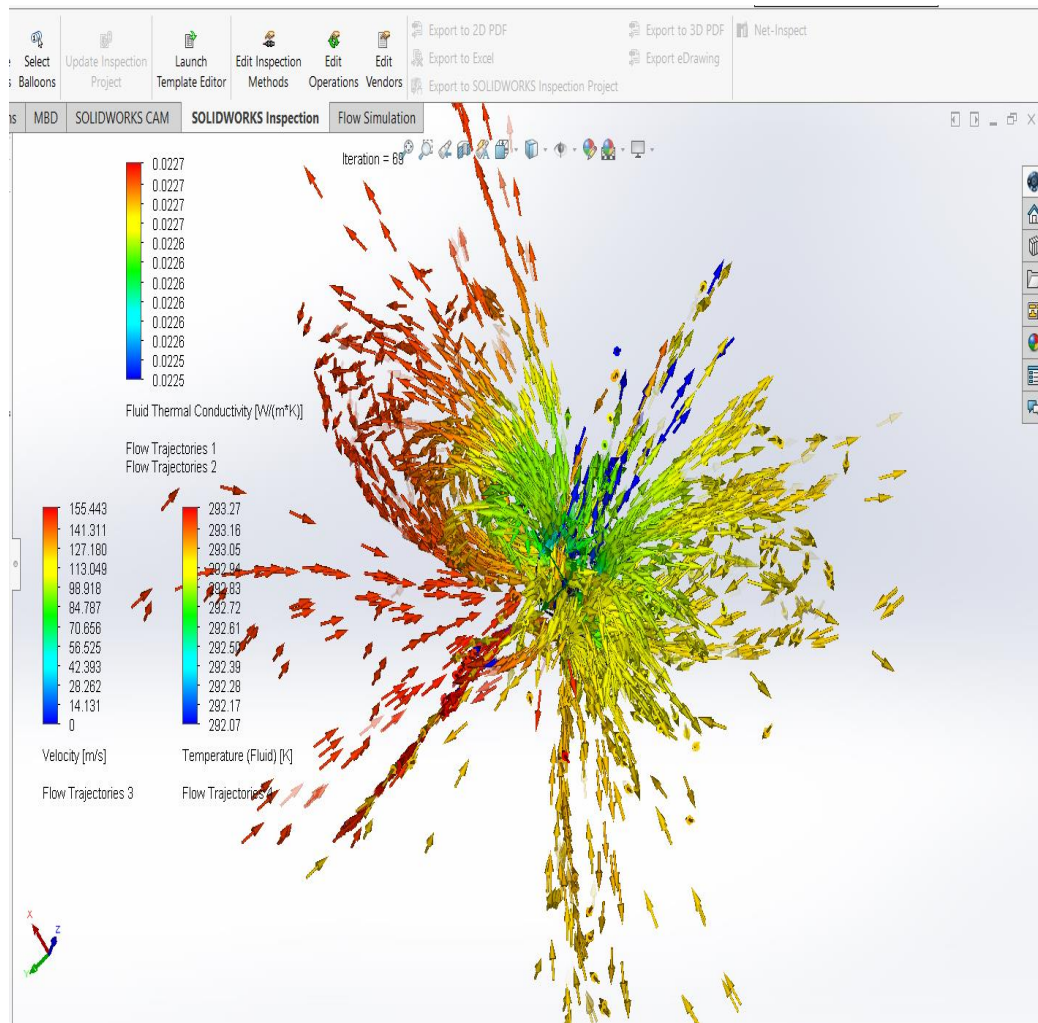
menunjukkan pola turbulen awal. Pada 3000 RPM, aliran mulai terfokus namun menghasilkan tekanan tinggi di sekitar sensor. Sementara itu, pada 10000 RPM, aliran sangat intens dan menyebar luas, menciptakan gangguan signifikan terhadap stabilitas pengukuran sensor. Oleh karena itu, penempatan dan perlindungan sensor menjadi krusial agar dapat tetap berfungsi optimal dalam berbagai kondisi kecepatan.



Gambar 3.11 Hasil Simulasi Solidwork dengan payload

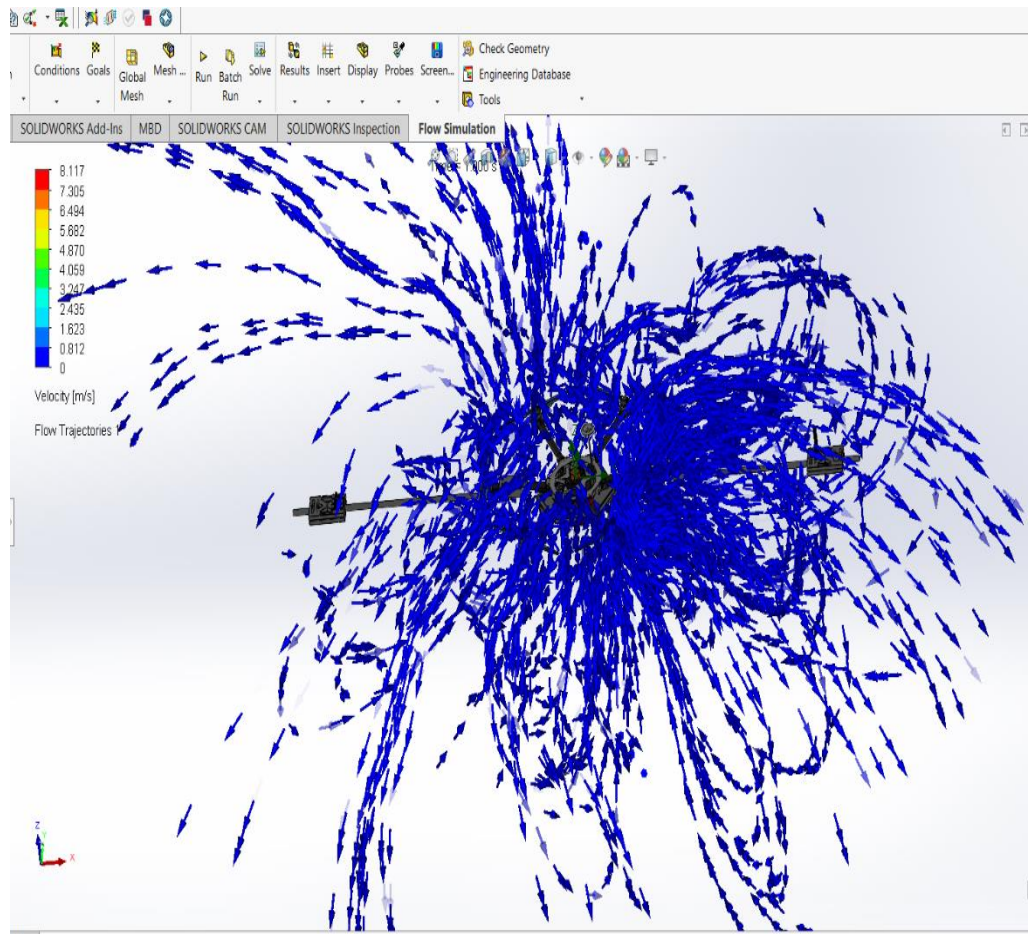
Dari hasil tersebut akan dilakukan perbaikan terhadap desain struktur dan penempatan hingga hasil simulasi mendekati yang diinginkan serta sesuai dengan kriteria.

Langkah selanjutnya adalah melakukan beberapa simulasi dengan beberapa RPM yang berbeda.



Gambar 3.12 keadaan Turbulensi saat motor berada dikecepatan 400RPM

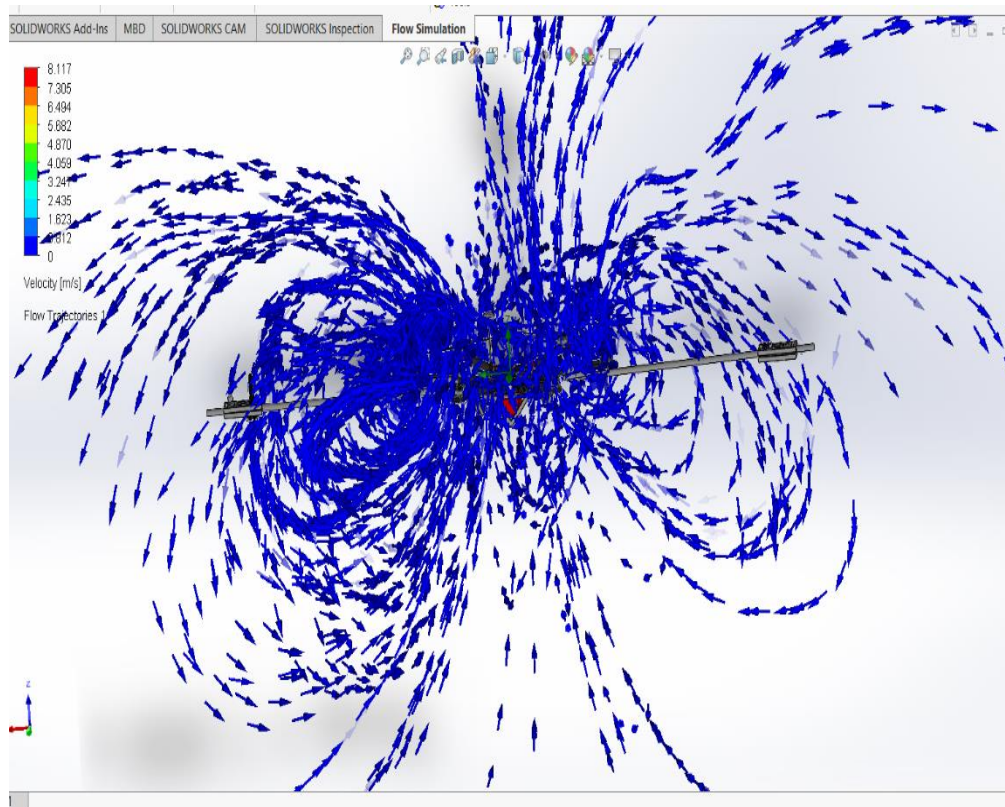
Pada Gambar 3.12, ditampilkan kondisi turbulensi yang terjadi ketika motor berputar pada kecepatan 400 RPM. Terlihat bahwa banyak area yang dipengaruhi oleh turbulensi. Hal ini disebabkan karena kecepatan 400 RPM merupakan tahap awal simulasi, di mana *drone* mulai bersiap untuk proses penerbangan. Pada tahap ini, aliran udara belum stabil, sehingga menghasilkan pola turbulensi yang beragam di sekitar *drone*. Namun, kondisi ini juga memengaruhi sensor yang berada di sekitar *drone*. Turbulensi menyebabkan gangguan pada pengukuran sensor, sehingga data yang diperoleh memiliki kemungkinan kurang akurat. Penyesuaian dan perlindungan tambahan diperlukan untuk memastikan sensor dapat bekerja dengan baik dalam kondisi seperti ini.



Gambar 3.13 keadaan Turbulensi saat motor berada dikecepatan 1200RPM

Pada Gambar 3.13, terlihat kondisi turbulensi yang terjadi saat motor berputar pada kecepatan 1200 RPM. Pada kecepatan ini, pola aliran udara di sekitar motor menjadi lebih kompleks dibandingkan dengan kecepatan 400 RPM. Kecepatan yang lebih tinggi ini menghasilkan distribusi turbulensi yang lebih luas, dengan intensitas aliran udara yang meningkat.

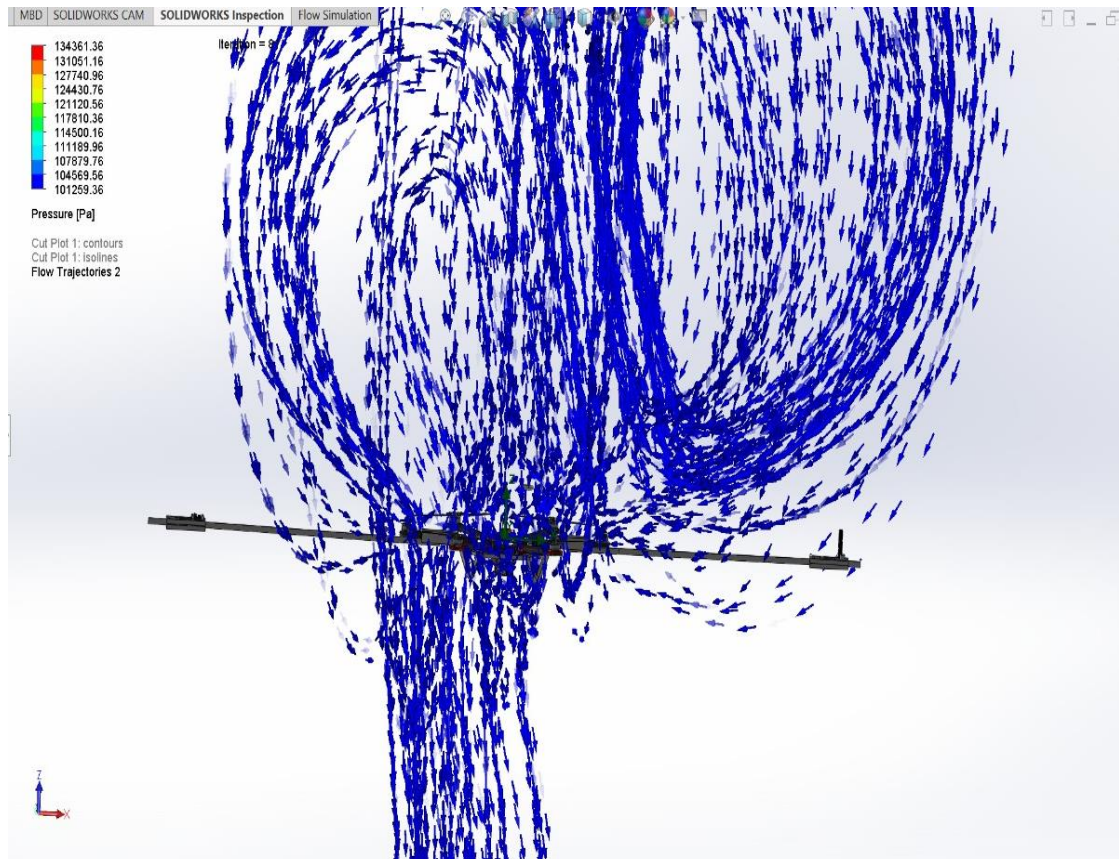
Hal ini mencerminkan bahwa pada 1200 RPM, motor menghasilkan lebih banyak energi kinetik yang berdampak pada pola aliran turbulen di sekitar *drone*. Kondisi ini menggambarkan fase yang lebih stabil dalam simulasi penerbangan, meskipun tetap terdapat variasi turbulensi di beberapa area. Namun, gangguan pada sensor masih terdeteksi akibat aliran turbulensi yang belum sepenuhnya stabil. Variasi tekanan dan kecepatan aliran udara di sekitar sensor memengaruhi kinerja pengukuran, yang menyebabkan data yang dihasilkan dapat terdistorsi atau tidak sesuai.



Gambar 3.13 keadaan Turbelensi saat motor berada dikecepatan 3000RPM

Pada Gambar 3.10, terlihat pola turbulensi yang semakin kompleks saat motor berputar pada kecepatan 3000 RPM. Kecepatan yang jauh lebih tinggi dibandingkan 400 RPM dan 1200 RPM menghasilkan aliran udara dengan intensitas yang lebih besar.

Pada tahap ini, distribusi turbulensi meluas secara signifikan, dengan kecepatan aliran yang mencapai puncaknya di sekitar bilah rotor. Hal ini disebabkan oleh peningkatan energi kinetik dari putaran motor, yang menghasilkan pola aliran turbulen yang lebih intens. Kondisi ini mencerminkan fase operasional *drone* yang sudah mendekati kecepatan optimal untuk penerbangan stabil, meskipun area turbulensi tetap menjadi faktor penting yang perlu diperhitungkan. Walaupun demikian, sensor di sekitar *drone* masih mengalami gangguan akibat turbulensi intens di beberapa area. Gangguan ini dapat menyebabkan fluktuasi data, terutama pada sensor yang terletak dekat dengan zona turbulensi tinggi.

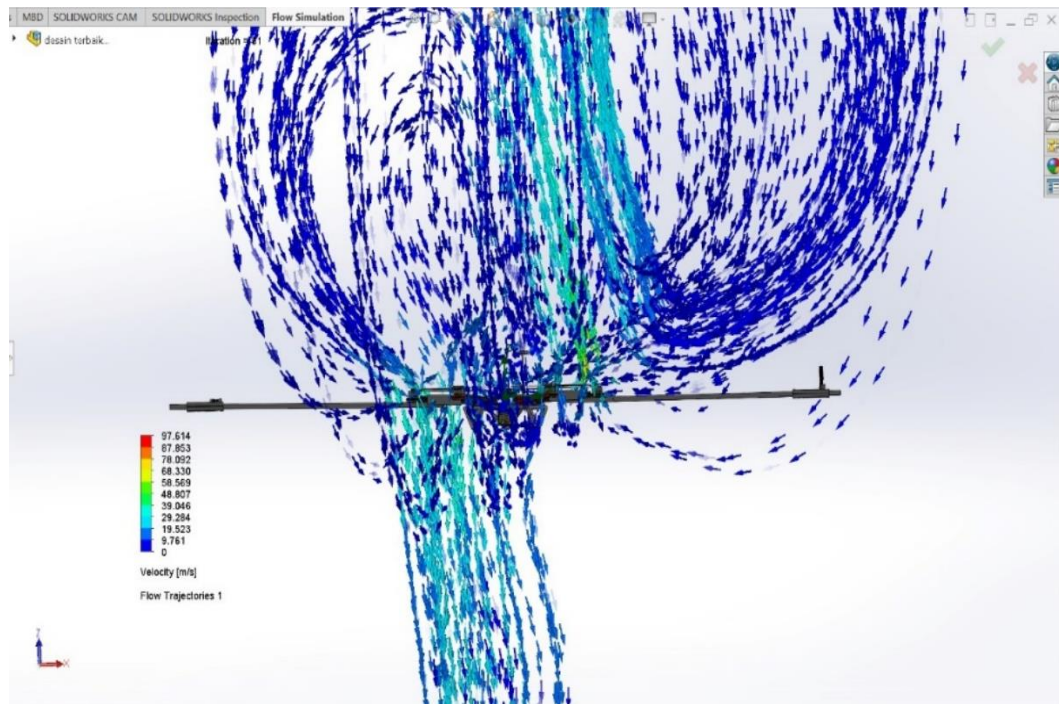


Gambar 3.14 keadaan Turbelensi saat motor berada dikecepatan 6000RPM

Pada Gambar 3.11, terlihat pola turbulensi yang semakin intens saat motor berputar pada kecepatan 6000 RPM. Pada kecepatan ini, aliran udara mencapai tingkat kecepatan yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan simulasi sebelumnya (400 RPM, 1200 RPM, dan 3000 RPM). Energi kinetik yang dihasilkan oleh putaran motor memberikan dampak signifikan pada distribusi aliran turbulen.

Kecepatan tinggi ini menyebabkan pola turbulensi menjadi lebih kompleks dan meluas ke area yang lebih besar di sekitar motor dan bilah rotor. Peningkatan tekanan dan kecepatan aliran udara terlihat jelas, yang menunjukkan dampak langsung dari putaran motor terhadap kondisi aerodinamika. Pada tahap ini, aliran udara mulai mendekati stabilitas maksimum, yang relevan untuk kinerja optimal drone selama fase penerbangan penuh.

Selain itu, kondisi sensor telah dirancang dan diposisikan sedemikian rupa sehingga aman dari pengaruh turbulensi yang terjadi, memastikan data yang dihasilkan tetap akurat dan tidak terganggu oleh aliran udara yang tidak stabil.



Gambar 3.15 keadaan Turbulensi saat motor berada dikecepatan 10000RPM

Pada Gambar 3.15, pola turbulensi mencapai puncaknya saat motor berputar pada kecepatan 10,000 RPM. Pada kecepatan ini, aliran udara menghasilkan intensitas turbulensi yang jauh lebih tinggi dibandingkan simulasi sebelumnya. Energi kinetik yang sangat besar dari putaran motor menciptakan distribusi aliran turbulen yang kompleks dan meluas di sekitar motor dan bilah rotor.

Meskipun intensitas aliran meningkat signifikan, kondisi sensor tetap aman dari pengaruh turbulensi. Desain dan penempatan sensor telah dioptimalkan untuk memastikan bahwa aliran udara tidak menyebabkan gangguan pada pengukuran. Dengan perlindungan tambahan yang diterapkan, sensor dapat menghasilkan data yang stabil dan akurat meskipun berada dalam lingkungan turbulensi yang ekstrem.

Dari beberapa kondisi kecepatan motor mempengaruhi peletakan sensor pada drone, pada saat rpm berada di 6000 rpm dan 10000 rpm dapat dilihat sangat minim terkena turbulensi pada peletakan sensor di kiri dan kanan *arm* diagram ini memperlihatkan hasil yang relative lebih stabil dan mendekati kondisi ideal dibandingkan 400 rpm, 1200 rpm dan 3000 rpm. kondisi turbulensi cenderung lebih stabil, dan desain sistem telah memastikan bahwa sensor aman dari gangguan, sehingga data yang dihasilkan menjadi lebih akurat.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan pengujian yang dilakukan, maka kesimpulan yang dapat diambil adalah:

1. Modifikasi UAV DJI S800 EVO berhasil dilakukan dengan integrasi sistem AMES (Aerial Measurement Eddy System), termasuk penempatan sensor CO₂, CH₄, tekanan, suhu, dan kelembaban secara simetris di kanan dan kiri arm UAV. Penempatan ini mempertimbangkan keseimbangan struktural dan stabilitas pusat gravitasi (CG).
2. Simulasi CFD (Computational Fluid Dynamics) menunjukkan bahwa posisi sensor yang dirancang berada di luar zona turbulensi utama, bahkan pada kecepatan rotasi maksimal (20312 RPM). Hal ini menunjukkan bahwa desain dan penempatan sensor telah menghindari gangguan aerodinamika, menjaga akurasi pembacaan sensor.
3. Validasi berdasarkan kondisi atmosfer (pagi, siang, sore) memperlihatkan bahwa sistem sensor tetap dapat beroperasi optimal dalam berbagai variasi suhu, tekanan, dan kelembapan. Kondisi pagi hari memberikan aliran paling laminar, sedangkan siang hari memiliki potensi turbulensi lebih tinggi, namun tetap tidak memengaruhi performa sensor secara signifikan.
4. Pergeseran Center of Gravity (CG) dari (x=0.07, y=0.09, z=0.81) menjadi (x=0.47, y=0.44, z=4.05) menunjukkan adanya perubahan signifikan. Namun karena distribusi beban dilakukan secara simetris dan adanya kompensasi oleh sistem kendali penerbangan DJI, UAV tetap dapat terbang dengan stabil tanpa gejala pitch/roll berlebih.
5. Dengan demikian, sistem AMES pada UAV ini valid secara struktur, aerodinamika, dan fungsional, dan layak diterapkan untuk misi pemantauan emisi gas di area perkebunan sawit.

5.2 Rekomendasi untuk penelitian selanjutnya

Adapun rekomendasi untuk penelitian lebih lanjut sebagai berikut:

1. Pengujian langsung di lapangan (flight test dengan data logging sensor gas) sangat disarankan untuk memvalidasi data aktual terhadap hasil simulasi CFD.
2. Peningkatan desain struktural seperti penggunaan material ringan namun kaku (carbon fiber dengan density lebih rendah) dapat membantu mengurangi pergeseran CG.
3. Integrasi dengan sistem telemetry real-time dan dashboard monitoring akan sangat membantu dalam pengambilan keputusan langsung di lapangan.
4. Penempatan sensor sebaiknya terus dianalisis melalui simulasi multi-variasi, termasuk variasi arah angin, perubahan beban, dan durasi penerbangan untuk memastikan keandalan sistem dalam skenario yang lebih kompleks.
5. Penggunaan software simulasi lain seperti *ANSYS Fluent* atau *COMSOL Multiphysics* untuk membandingkan hasil simulasi

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Alven, I. Sucahyo, and M. Yantidewi, "Monitoring kandungan CO2 berbasis IoT dengan NodeMCU ESP8266 dan sensor MQ135," *Jurnal Sains dan Pendidikan Fisika*, vol. 17, p. 249, 2021,.
- [2] Y. Sun, D. Su, Z. Quan, H. Shang, B. Geng, X. Lin, P. Jing, Y. Bao, Y. Zhao, and W. Yang, "Overview of the UAV-based eddy covariance fluxes measurements technique," *Advances in Earth Science*, vol. 34, no. 8, pp. 842–854, 2019..
- [3] Y. Sun, J. Ma, B. Sude, X. Lin, H. Shang, B. Geng, Z. Diao, J. Du, and Z. Quan, "A UAV-based eddy covariance system for measurement of mass and energy exchange of the ecosystem: Preliminary results," *Sensors (Switzerland)*, vol. 21, no. 2, pp. 1–27, Jan. 2021
- [4] F. Zulfiryansyah, S. Syahririni, and M. N. Habibi, "Air quality monitoring system using unmanned aerial vehicle (UAV) quadcopter type," *Procedia of Engineering and Life Science*, vol. 2, no. 2, 2022.
- [5] M. A. Stamate, C. Pupăză, F. A. Nicolescu, and C. E. Moldoveanu, "Improvement of hexacopter UAVs attitude parameters employing control and decision support systems," *Sensors*, vol. 23, no. 3, 2023,
- [6] S. Bansal, I. F. Creed, B. A. Tangen, S. D. Bridgham, A. R. Desai, K. W. Krauss, et al., "Practical guide to measuring wetland carbon pools and fluxes," *Wetlands*, vol. 43, no. 8, p. 105, 2023.
- [7] Y. I. Ulumuddin, "Metana: Emisi gas rumah kaca dari ekosistem karbon biru, mangrove," *Jurnal Ilmu Lingkungan*, vol. 17, no. 2, pp. 359–372, 2019
- [8] A. Ismail, "Potensi penurunan emisi gas rumah kaca (GRK) dalam kegiatan belajar di rumah secara online: Analisis jejak karbon (carbon footprint analysis)," *Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 6, no. 2, pp. 195–203, 2020
- [9] https://www.researchgate.net/figure/Classification-of-UAV-based-on-wings-and-rotors_fig2_344592031
- [10] G. Nugroho, Y. D. Hutagaol, and G. Zuliardiansyah, "Aerodynamic performance analysis of VTOL arm configurations of a VTOL plane UAV using a computational fluid dynamics simulation," *Drones*, vol. 6, no. 12, 2022
- [11] Y. Sun, J. Ma, B. Sude, X. Lin, H. Shang, B. Geng, Z. Diao, J. Du, and Z. Quan, "A UAV-based eddy covariance system for measurement of mass and energy exchange of the ecosystem: Preliminary results," *Sensors (Switzerland)*, vol. 21, no. 2, pp. 1–27, 2021
- [12] <https://www.rotordronepro.com/hpheli-f600-hexacopter/hobbypeople-hexacopter/>

- [13] N. Chavan, S. S. Patil, and S. S. Patil, "Design of Weight Lifting Quadcopter using Flight Controller," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 9, no. 6, pp. 2278–8875, June 2020.
- [14] N. Erlangga, S. Sindhu, and E. Yuniarti, "Analisis pembebanan statis pada struktur hexacopter drone untuk pertanian (DRUPER)," *Jurnal Teknologi Kedirgantaraan*, vol. 9, no. 1, pp. 9–18, 2024.
- [15] Rahmawaty and S. Dharma, "Simulasi computational fluid dynamic (CFD) pada turbin screw Archimedes skala kecil," *Proc. 9th Appl. Business Eng. Conf. (ABEC)*, vol. 9, pp. 1253–1262, 2021
- [16] J. Eliyanto and J. Hernadi, "Pemodelan Persamaan Navier-Stokes untuk Aliran Fluida Tidak Termampatkan," *Jurnal Ilmiah Matematika dan Pendidikan Matematika*, vol. 10, no. 1, pp. 39–49, 2015.
- [17] R. S. McKay, M. J. Kingan, and R. Go, Experimental investigation of contra-rotating multi-rotor UAV propeller noise, *Acoust. 2019, Sound Decis. Mov. Forw. with Acoust. - Proc. Annu. Conf. Aust. Acoust. Soc.*, no. 1, 2020, pp. 1–10
- [18] C. A. Hapsoro and W. Srigutomo, "Pemodelan aliran fluida 2-D pada kasus aliran permukaan menggunakan metode beda hingga," *Jurnal Matematika & Sains*, vol. 18, no. 3, pp. 81–92, Des. 2013.
- [19] A. Amalia, "Analisis Tegangan Regangan pada Pelat Deck dan Bottom Kapal Ferry Menggunakan Metode Elemen Hingga," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 8, no. 2, pp. 45–56, 2021
- [20] M. H. Harun, S. S. Abdullah, M. S. M. Aras, M. B. Bahar, and F. Ali, "3D collision avoidance system for unmanned aerial vehicle (UAV) with decentralized approach," *IIUM Engineering Journal*, vol. 24, no. 2, pp. 373–390, 2023.
- [21] R. Ardiansyah and N. Wirawan, "Perhitungan Letak dan Pergeseran Pusat Gravitasi Pesawat LSU-03NG untuk Menentukan Posisi Beban dan Pemberat," in *Seminar Nasional IPTEK Penerbangan dan Antariksa XX*, 2016.
- [22] M. Z. Zhang, Z. Q. Zhang, and H. K. Liu, "Computational Fluid Dynamics Analysis of Unmanned Aerial Vehicles," *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 29, no. 4, pp. 04016015, 2016
- [23] C. K. Kartiria, E. Erhaneli, and C. Y. Windra, "Penerapan mikrokontroler Arduino Mega 2560 sebagai monitoring pada pembacaan arus 3 phasa di Gardu Induk 150 kV Lubuk Alung," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 10, no. 1, pp. 37–45, 2021.
- [24] <https://rillityworwayfqschematic.z21.web.core.windows.net/arduino-mega-2560-tutorial.html>

- [25] O. Geiss, "Effect of wearing face masks on the carbon dioxide concentration in the breathing zone," *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 21, no. 2, pp. 1–7, 2021,
- [26] https://wiki.dfrobot.com.cn/_SKU_SEN0220_Infrared_CO2_Sensor_0-50000ppm_Wide_Range
- [27] P. F. Pereira and N. M. M. Ramos, "Low-cost Arduino-based temperature, relative humidity, and CO2 sensors—An assessment of their suitability for indoor built environments," *Journal of Building Engineering*, vol. 60, p. 105151, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105151>
- [28] <https://kr.element14.com/sensirion/sht85/humidity-temperature-sensor-digital/dp/3106917>
- [29] D. A. Putra, T. Rahmadani, A. D. Wicaksono, and A. Triwiyatno, "Sistem pendeteksi kadar gas methana (CH4) berbasis IoT menggunakan NODEMCU ESP8266 dan sensor gas MQ-5," *Transient*, vol. 8, no. 2, pp. 181–186, 2019 <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/transient>
- [30] B. B. Ngoune, M. Dumon, B. Vignesh, B. Bondu, S. Subbiah, G. Perrin, and H. Hallil, "Comparison of calibration strategies for a high sensitivity PEI-based RF humidity sensor," *IEEE Sensors Journal*, vol. 24, no. 8, pp. 13518–13529, Apr. 2024.
- [31] X. Meng, K. Pang, B. Di, W. Li, Y. Wang, J. Zhang, and Y. Xu, "Road grade estimation for vehicle emissions modeling using electronic atmospheric pressure sensors," *Frontiers in Environmental Science*, vol. 10, p. 1051858, 2023.
- [32] <https://device.report/manual/6230898>
- [33] A. Y. Alfaridzi and A. Kurniawan, "Analisis computational fluid dynamic pengaruh jarak propeller pada contra rotating propeller terhadap gaya dorong pesawat tanpa awak," *JTM-ITI (Jurnal Teknik Mesin ITI)*, vol. 6, no. 2, p. 87, 2022.
- [34] <https://image.made-in-china.com/2f0j00gTcYNVkWhdqG/14500-800mAh-3-7V-Rechargeable-Li-ion-Battery.jpg>
- [35] D. S. Wie, "Perencanaan dan implementasi prototipe pembangkit listrik tenaga mikro hidro (PLTMH)," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 7, no. 1, pp. 31–36, Dec. 2019.
- [36] F. R. Menter, M. Kuntz, and R. B. Langtry, "Ten years of industrial experience with the SST turbulence model," *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4*, pp. 625–632, 2003.
- [37] H. H. Jassim, F. M. Al-Dabbagh, and A. S. Al-Kayiem, "Turbulence models used for computational fluid dynamics (CFD) of forced convection heat transfer," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 14, pp. 2019.

- [38] M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner, and M. B. Bailey, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 8th ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2014.
- [39] R. Mudzakir dan H. Widianoro, "Simulasi CFD Turbin Francis Skala Laboratorium sebagai Alat Bantu Praktikum Menggunakan Software SolidWorks," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 19, no. 2, hlm. 223–232, 2024.