

Konsep Desain Kapal Udara Sebagai Transportasi Massal Udara Di Wilayah Jabodetabek

Riyan Eko Prasetyo^{(1)*}, Michael Tobing⁽¹⁾, Sovian Aritonang⁽¹⁾, Novsky Asmoro⁽¹⁾, Gita Amperiawan⁽²⁾

(1) Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Jakarta, Indonesia

(2) PT Dirgantara Indonesia, Bandung, Indonesia

* Corresponding Author : Riyan.prasetyo@tp.idu.ac.id

Abstract - *The existing mass transportation cannot accommodate Jakarta's population increase. The Central Statistics Agency stated that the number of vehicles in Jakarta in 2022 was 26.370.535. The high level of vehicle mobilization results in vehicle congestion in Jakarta. For this reason, it is necessary to have a mode of mass transportation to be a solution to solving congestion. Airships are air mass transportation with a propulsion system consisting of gas and engines. The design of the mode of transportation is carried out using a quantitative method through a literature review approach and numerical formulation analysis. The resulting airship designs have a capacity of 40 people, a total load of 9764 kg, balloon dimensions of 46 m x 13 m x 18 m, and gondola dimensions of 11 m x 4 m x 2m. This research provides a study of the design of mass transportation modes with air operations, which can be a solution to the congestion that occurs. Can reduce existing congestion with efficient routes for the mobilization process at work time.*

Keywords. *Population Increase, Design Conceptual, Airships, Mass Transport.*

I. PENDAHULUAN

Jakarta sebagai ibu kota dengan pusat aktivitas strategis, seperti ekonomi, politik, Pendidikan, hingga sampai sosial, menjadikan alasan banyak masyarakat yang hilir mudik ke Jakarta. Dengan luas provinsi mencapai 661.23 km², Jakarta memiliki jumlah penduduk pada tahun 2021 sebesar 10.644.776 jiwa, hal ini mengalami penambahan di tahun 2022 menjadi 11.249.585 jiwa^{[1][2]}.

Pertambahan penduduk akan berpengaruh pada sistem transportasi yang ada, salah satunya masyarakat akan memiliki beberapa jenis kendaraan pribadi sebagai moda transportasi dalam menunjang mobilitas. Jumlah kendaraan di Jakarta, pada tahun 2020 jumlah kendaraan sebanyak 20.221.821 kendaraan, dengan kendaraan sepeda motor yang mendominasi sebanyak 16.141.380 kendaraan, dan pada tahun 2021 memiliki jumlah kendaraan sebanyak 21.758.695 kendaraan, dengan sepeda motor yang mendominasi sebanyak 16.519.197 dan pada tahun 2022 dengan jumlah kendaraan sebanyak 26.370.535, dengan jumlah sepeda motor yang mengalami penambahan dari tahun sebelumnya yaitu sebanyak 17.304.447^[3]. Dalam mendukung mobilitas masyarakat di wilayah Jabodetabek adalah dengan menyediakan transportasi umum, salah satunya adalah Transjakarta yang merupakan sistem Bus Rapid Transit^[4]. Selain Transjakarta, transportasi umum yang dapat dinikmati oleh masyarakat di wilayah Jabodetabek adalah KRL *Commuter Line*, yang merupakan moda transportasi massal yang berbasis rel untuk mengakomodasi kebutuhan mobilisasi di wilayah Jabodetabek^[5].

Moda transportasi massal yang ada saat ini merupakan transportasi darat, sehingga dapat menjadi salah satu penyebab kemacetan yang terjadi. Transportasi udara menjadi alternatif utama dalam mencapai waktu perjalanan yang lebih cepat untuk sampai di daerah tujuan^[6]. Oleh karena itu perlu moda transportasi massal dengan sistem medan operasi di udara selain pesawat yang dapat secara efektif menjadi solusi mengatasi

atau mengurangi indeks kemacetan di wilayah kota. Transportasi tersebut adalah kapal udara. Kapal udara pertama kali beroperasi untuk perjalanan trans atlantik yang mewahdengen bentuk dan struktur internal pesawat yang lebih ringanyang biasa dikenal dengan nama Zeppelin. Kapal udara memiliki bahan bakar berupa gas hydrogen atau helium, yang memiliki berat lebih ringan daripada udara. Kapal udara ini dapat terbang selama delapan belas menit di atas gantungan di Manzell pada 2 Juli 1900^[7].

Kapal udara merupakan salah satu infrastruktur dalam teknologi *High Altitude Platform* (HAP)^[8]. Kapal udara pada penggunaannya secara umum dikembangkan sebagai media pariwisata, media iklan, dan sebagai media pemantauan. Salah satunya dalam penelitian^[9] yang membahas penggunaan mobile zappleline sebagai media Teknologi Modifikasi Cuaca (TMC) dan Penipisan Polutan Udara. Karakteristik terbang pada kapal udara berbeda dengan wahana transportasi udara lainnya, dengan kehandalannya dapat dimanfaatkan dalam kebutuhan militer atau sipil. Tulisan ini memberikan usulan solusi penggunaan kapal udara sebagai moda transportasi massal di wilayah Jabodetabek dalam mengatasi permasalahan kemacetan yang ada, dengan mengusulkan desain konseptual moda transportasi massal udara.

II. METODE DAN PENDEKATAN

Penelitian yang dilakukan menggunakan metode kuantitatif melalui pendekatan tinjauan literatur dan analitik formulasi numerik. Tinjauan literatur digunakan untuk mendapatkan gambaran dan analisis terkait kapal udara serta konsep desain kapal udara yang telah diteliti sebelumnya. Analitik formulasi numerik dilakukan dengan persamaan fisika yang dilandasi konsep dasar aerodinamika.

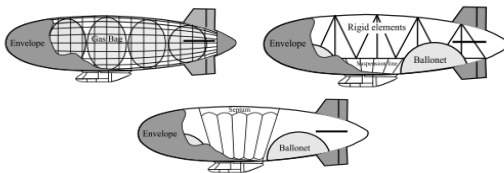
Metode konseptual desain kapal udara diawali dengan tinjauan literatur dan dilanjutkan persyaratan operasi, menentukan persyaratan misi, *requirement design development* atau *Design*

Requirement Objective (DRO), dan Konseptual Design.

1. Studi Literatur

Beberapa tahun akhir ini kapal udara menjadi cabang riset di bidang aeronautika. Didorong dengan perkembangan teknologi, seperti material composite, *vecroting engines*, satelit peramal cuaca, dan desain yang diciptakan dari computer. Perkembangan modernisasi kapal udara dijadikan sebagai platform transportasi yang efisien dengan muatan yang besar, konsumsi energi yang rendah, dan misi daya jelajah yang panjang^[10]. Kendaraan yang lebih ringan dari udara (LTA) merupakan kapal udara dan kendaraan apung dengan kemajuan baru bahan dan teknologi^[11].

Berdasarkan konfigurasi struktural selubung, jenis kapal udara dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu kapal udara kaku, kapal udara semi kaku, dan tidak kaku. Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Jenis kapal udara, 1 kapal udara kaku, 2 kapal udara semi kaku, dan 3 kapal udara tidak kaku

Selain jenis kapal diatas kapal udara juga memiliki jenis kapal udara hibrid, kendaraan udara angkat berat, kapal udara ketinggian tinggi, kendaraan udara angkat dengan bantuan daya apung, dan jenis dengan sebutan lainnya. Beberapa negara di dunia dari sejarah perkembangan kapal udara sudah menggunakan beberapa klasifikasi jenis kapal udara. Salah satunya kapal udara yang diciptakan oleh America dengan jenis semi kaku yang pertama kali. Kapal udara tersebut adalah *Goodyear*^[12].

Kapal udara kaku memiliki bentuk yang dipertahankan dengan terlepas dari adanya tekanan selubung, yang berkerangka logam. Panjang kapal udara kaku cukup besar untuk kerangka struktural kaku, dengan volume yang lebih dari dua juta kaki kubik. Selain itu kapal

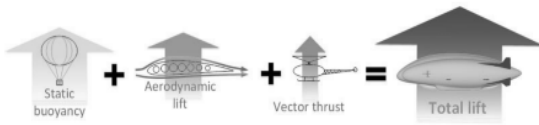
udara kaku dapat mengatasi kemungkinan runtuhnya hidung kapal udara pada kecepatan penerbangan tinggi^[11].

Jenis kapal udara semi kaku memiliki beberapa karakteristik yang ada pada kapal udara kaku dan kapal udara non kaku. Pada kapal udara semi kaku memiliki beberapa bentuk struktur yang terdiri dari *keel* dan struktur rangka. Bentuk slubung ekstenal dipertahankan oleh adanya tekanan internal dalam gas pengangkat. Kapal udara semi kaku menggunakan balon dengan udara untuk menjaga keseimbangan dari suatu tekanan antara gas pengangkat bagian dalam dan udara luar pada saat manuver naik dan turun^[11]. Kapal udara tidak kaku didefinisikan sebagai kapal udara yang terdiri dari perbedaan antara tekanan pada gas pengangkat di lambung kapal udara dengan atmosfer.

2. Gaya pada Kapal Udara

Kapal udara dalam kemampuannya untuk terbang, merupakan hasil dari gaya angkat yang dihasilkan. Total gaya angkat yang dihasilkan merupakan perpaduan antaran *static buoyancy*, *aerodynamics lift*, dan *vector thrust*. Perpaduan komponen gaya tersebut dapat ditunjukkan pada **Gambar 2**^[13]. *Aerodynamic* merupakan suatu pergerakan udara atau gas lainnya yang bersifat fluida, yang memiliki gaya dengan gerak relatif terhadap fluida tersebut. Kapal udara merupakan aerostat yang dilengkapi dengan penggerak dan sistem dengan cara mengendalikan arah gerak. Pergerakan kapal udara ketika pembangkit listriknya tidak beroperasi maka akan bertindak sebagai balon udara.

Aerodinamika kapal udara secara sederhana terdiri dari gaya angkat magnus. Gaya ini bekerja dalam arah tegak lurus terhadap arah gerakan dan sumbu putar. Gaya magnus bekerja secara vertikal ke atas untuk memungkinkan menempuh jarak yang lebih jauh daripada dalam ruang hampa^[14].



Gambar 2. Kombinasi komponen gaya pada kapal udara, untuk menghasilkan total gaya angkat

Persamaan hambatan aerodinamika dapat ditunjukkan pada persamaan 1^[15].

$$D = \frac{1}{2} u^2 V_{ext}^{2/3} C_{D,V} \quad (1)$$

dan gaya angkat aerodinamika dapat ditunjukkan pada persamaan 2^[15].

$$L' = \frac{1}{2} u^2 V^{2/3} C_{L,V} \quad (2)$$

Proses gaya angkat pada kapal udara secara mendasar dipengaruhi oleh gaya angkat, gaya apung, dan adanya gaya berat atau pengaruh pembebanan yang dimilikinya. Gaya angkat menggunakan gas dengan didasarkan pada prinsip hukum Archimedes dan dapat didefinisikan sebagai *principle lift*. Gaya angkat terjadi karena adanya perbedaan densitas antara gas dengan udara. Persamaan *Principle Lift* (PL) ditunjukkan pada persamaan 3.

$$PL = V(\rho_A - \rho_B) = V\Delta\rho, \text{ kg} \quad (3)$$

V merupakan volume gas udara yang ada di dalam kapal udara dalam satuan m³, ρ_A, ρ_B merupakan densitas udara dan gas dalam satuan m³, $\Delta\rho$ merupakan *buoyancy* spesifik untuk 1 m³ gas. Kemudian volume gas dan udara secara teori dapat ditentukan dengan persamaan Clapeyron untuk gas ideal pada persamaan 4.

$$pv = RT ; v = \frac{RT}{P} = \frac{1}{\rho} ; \rho = \frac{P}{RT} \quad (4)$$

dengan, v merupakan nilai gas spesifik dengan satuan m³/kg m, R merupakan konstanta gas dalam satuan *kg.m/kg°C* dengan 29.27 untuk udara, 424 untuk hydrogen, dan 212 untuk helium, T merupakan temperatur mutlak, °K, p tekanan atmosfer dengan satuan kg/m².

Kapal udara dapat naik ke atas jika gaya apung lebih besar dari beban total kapal udara tersebut ditambah dengan gaya friksi yang dialaminya. Gaya friksi (Fd) sebanding dengan kecepatan (v) dan luas bidang frontal kapal udara (A). Bidang

frontal ini berupa bidang *ellipse* dengan jari-jari diagonal a dan b. Koefisien drag dapat dihitung berdasarkan persamaan Squire-Young dan konfigurasi kapal udara dapat diitung dengan metode *non-circulate coupling* [16]. yang diterapkan untuk perhitungan koefisien drag pada kapal udara [17]. Persamaan koefesien hambatan berdasarkan persamaan Squire-Young [18] yang ditunjukkan pada persamaan 5.

$$C_{dv} = \frac{Fd}{\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2 v^{2/3}} = \frac{4\pi}{v^{2/3}} r\theta U_e^{(H+5)/2} \quad (5)$$

dengan Fd merupakan gaya hambat, ρ adalah densitas atmosfer, U_{∞} adalah kecepatan pada saat inifititas, V adalah Volume lambung kapal udara, dan r adalah jari-jari generatrix. Gaya hambat dapat dirumuskan pada persamaan 6.

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho_n \cdot v^2 \cdot C_d \cdot A. \quad (6)$$

Luas bidang frontal dengan komponen hambatan vertikal berupa bidang ellips dengan jari-jari diagonal luas *ellips*, yang ditunjukkan pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Bentuk bidang frontal ellips dan ditinjau dari vertikal berupa lingkaran

Komponen gaya yang bekerja terdiri dari komponen vertikal dan komponen horisontal, komponen vertikal terdiri dari gaya angkat (F_{lift}) dengan arah ke atas, gaya berat (W), dan gaya hambat (F_{dv}). Sedangkan pada komponen horisontal terdiri dari gaya dorong (F) dan gaya hambat (F_{dh}) yang arahnya berlawanan arah dengan gerakan benda [9]. Arah vertikal dapat ditinjau dengan menggunakan hukum Archimedes, dengan besarnya gaya apung pada sebuah benda dalam fluida sebanding dengan berat fluida yang dipindahkan, yang ditunjukkan pada persamaan 7 dan dan komponen gaya vertikal ditunjukkan pada persamaan 8.

$$F_y = \Delta\rho \cdot V \cdot g = P_L \cdot g \quad (7)$$

$$\sum F_y = F_y - (W + F_{dy}) \quad (8)$$

Perhitungan gaya hambat pada kapal udara menurut Lutz dan Wegner^[19] serta Nakayama dan Patel^[20] ditentukan dengan empat langkah yaitu, adanya distribusi kecepatan pada permukaan lambung kapal dihitung dengan mengasumsikan aliran yang tidak dapat dimampatkan dan tidak kental dengan teori aliran potensial, ketebalan batas laminar dihitung menggunakan persamaan dari hasil langkah pertama, titik balik aliran laminar ditentukan, dan ketebalan lapisan batas dan kehilangan momentum dihitung dengan model lapisan batas aliran turbulen pada daerah setelah titik transisi aliran laminar. Sedangkan pada komponen horizontal terdiri dari gaya dorong (*thrust*) atau adanya gaya Tarik eksternal F_x yang diberikan dengan dikurangi gaya hambat F_{dx} . Pada komponen horisontal dapat digunakan persamaan 9.

$$\sum F_x = F_x - F_{dx} \quad (9)$$

3. Kebutuhan Misi

Tahapan mission requirement merupakan tahap dalam menentukan tujuan dan kegunaan dari kapal udara. Mission requirement didorong oleh kebutuhan untuk mencapai tujuan ilmiah dalam menciptakan moda transportasi udara dengan misi pemecah kemacetan. Misi ini berkaitan dengan lingkup operasi atau rute dari kendaraan, jumlah penumpang, batasan-batasan desain, peraturan lalu lintas, regulasi yang ada, dan sebagainya. Misi dari kendaraan ditentukan pada permasalahan yang ada, dengan menggunakan analisis dimensi ruang lingkungan, diantaranya sebagai berikut:

1. Pertambahan penduduk yang semakin bertambah setiap tahunnya berakibat semakin bertambahnya kendaraan sebagai moda transportasi penduduk, sehingga akan menghasilkan keterbatasan ruang lingkup jalan-jalan yang ada.
2. Kebutuhan kendaraan atau moda transportasi massal yang dapat mengangkut orang dengan jumlah banyak dengan perpindahan tempat secara efektif dan murah.

3. Keterbatasan ruang darat, dibutuhkan moda transportasi massal dengan memanfaatkan ruang udara.

4. Konseptual Desain

Konsep desain dilakukan dengan bersumber pada literatur dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Diantaranya yaitu; Zhang, dkk., melakukan penelitian mengenai konseptual desain dan analisis kapal udara hybrid dengan menggunakan energi terbarukan. Metode yang digunakan berupa komputasional dinamika fluida dengan dua tipe kapal udara hybrid dengan tenaga solar pada ketinggian dan gas hidrogen dalam penerapannya sebagai kapal udara kargo^[13].

Madmud melakukan penelitian dengan menganalisis desain modern kapal udara dengan menggunakan CAD dan studi kasus terdahulu, dengan memberikan hasil desain pesawat modern dengan membandingkan structural desain balon dan gondala gantung pada kapal udara klasik yang aerodinamis^[21]. Jose melakukan penelitian dengan membahas mengenai konseptual desain kapal udara hybrid, dengan mendemonstrasikan tipe teknologi untuk meode transportasi dan kemajuan baru, bidang material dan struktur, stabilitas dan kontrol, serta sistem propulsi^[22].

Manikandan, dkk., melakukan penelitian mengenai desain dan analisis *hybrid electric multi-lobed* pada kapal udara dalam penggunaannya sebagai transportasi kargo, dengan dihasilkan kapal udara hybrid dengan tenaga terbarukan dengan metode komputasional fluida dinamika, menggunakan sistem propulsi hybrid^[23]. Selanjutnya kebutuhan desain pada kapal udara dapat dibandingkan dengan sumber kapal udara sebelumnya, yang ditunjukkan pada gambar 4, sebagai penentuan konseptual desain.

Name	Design	LZ 127 Graf Zeppelin (1928-37)	LZ 129 Hindenburg (1931-36)	GZ-20A (1969)	Voyager	SkyCat 20	Aeroscraft ML866
Type	Transport	Transport	Transport	Transport	Transport	Transport	Transport
Manufacturer	NA	Zeppelin	Zeppelin	Goodyear	21st Century Airships Team Inc.	World SkyCat Ltd.	Worldwide Acros Corporation
Length (ft)	300	776	804	192	223	266	210
Diameter (ft)	110	100	135	50	190	134.5	118
Height (ft)	110	100	135	59.5	125.6	72	56
Volume (ft ³) 10 ⁶	1.901	3.707	7.062	0.2027	0.532	1.1	1.388
Weight (tons)	36.25	95	255.75	6.42	not found	58.6	not found
Speed (mph)	57	72	76	50	not found	85	138
Range (miles)	1500	4900	4500	not found	not found	2700	3100
Altitude (ft)	12000	650 (max 6000)	650	1000-3000 (max 10,000)	not found	9000	5000
PAX	30 + 10 crew	20 + 36 crew	72 + 40 crew	6 + 1 pilot	19 + 2 pilots	70	not found

Gambar 4. Spesifikasi kapal udara sebagai rujukan sumber konseptual desain

Tahap konseptual desain merupakan tahap penentuan dimensi dari kapal udara, setelah misi dari kendaraan didapatkan. Dalam penentuan dimensi kapal udara yang direncanakan memperhatikan beberapa batasan-batasan desain, diantaranya adalah, lingkungan operasi yang mencakup wilayah perkotaan, yang menghubungkan tiga kabupaten (Kabupaten Tangerang, Kabupaten Bekasi, dan Kabupaten Bogor), lima kota (Kota Tangerang, Kota Bekasi, Kota Depok, Kota Bogor, Kota Bekasi, Kota Tangerang Selatan) dan Povinsi DKI Jakarta, kondisi cuaca dalam keadaan normal, dengan ketinggian di bawah pesawat komersil dengan pembagian 4 rute line dan 3 line regular dengan 1 line interkoneksi. Besaran dalam desain kapal udara dapat ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Properti rancangan konseptual desain kapal udara.

Besaran	Nilai
Panjang (P)	46 m
Lebar (L)	18 m
Tinggi (H)	13 m
Massa total (Mtot)	9763,6 Kg

Volume gas yang menempati *envelope* tergantung pada ketinggian dan temperature dengan memperhatikan massa jenis udara (ρ_{air}) dan massa jenis gas apung (ρ_g) [15]. Hal ini sesuai dengan hukum Charles yang menyatakan bahwa volume yang ditempati oleh sejumlah gas akan berbanding lurus dengan suhu

absolutnya, jika dengan tekanan tetap konstan^[24]. Persamaan volume gas berdasarkan fisika ditunjukkan pada persamaan 13.

$$\Sigma F = 0 \quad (10)$$

$$-\rho_{gas} g V + \rho_{udara} g V - m g = 0 \quad (11)$$

$$(\rho_{udara} - \rho_{gas}) g V = m g \quad (12)$$

$$V = \frac{m}{(\rho_{udara} - \rho_{gas})}, m^3 \quad (13)$$

Volume atmosfer dapat dihitung dengan menggunakan data Atmosfer Standar (ISA)^[15]. Ketetapan atmosfer yang didefinisikan oleh *International Standard Atmosphere* (ISA). ISA dapat digambarkan dalam sebuah persamaan sampai ketinggian 11000 m yang ditunjukkan pada persamaan 14 dan 15.

$$\frac{p}{p_o} = \left(1 - \frac{H}{44300}\right)^{5.256} \quad (14)$$

$$\frac{\rho_H}{\rho_o} = \Delta = \left(1 - \frac{H}{44300}\right)^{4.256} \quad (15)$$

dengan mengasumsikan *Mean Sea Level (MSL)* yang sesuai definisi *ICAO Document 7488/2*^[25].

Ukuran lambung kapal dapat mempengaruhi gaya yang ada pada kapal udara. Dengan menggunakan gaya vertikal, kapal udara dapat diinterpretasikan sebagai sebuah lingkaran dan pada bidang frontal dapat diinterpretasikan berupa bidang ellips yang ditunjukkan pada **Gambar 3**. Luas bidang frontal dapat dirumuskan dengan πab . Bentuk lambung kapal udara sehingga mempengaruhi gaya hambat, yang berkaitan dengan koefisien drag sebesar 0.47 atau bentuk *streamlined body*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Perhitungan parameter desain awal

Kapal udara harus dapat dikendalikan dengan aman dan dapat manuver selama take off, climb, level flight descent, landing, dan tingkat penerbangan dengan satu mesin tidak beroperasi dan sisa vektor mesin di semua posisi goyangan. Konseptual desain dasar moda transportasi pemecah kemacetan yang diterapkan di Jakarta, Indonesia dianalisis dengan menggunakan gaya aerostatik

yang ada di kapal udara. Secara sederhana kapal udara memiliki prinsip dari balon udar yang terdiri dari *envelope*, *burner*, dan *Basket*. Ketiga bagian tersebut merupakan komponen utama yang ada pada balon udara. Envelope merupakan bentuk yang berupa kantong sebagai tempat udara dipanaskan dan berbahan nilon. Burner merupakan alat yang memiliki fungsi sebagai pemanas udara yang ada di dalam envelope. Sedangkan Basket merupakan tempat untuk penumpang.

Prinsip dasar desain kapal udara merupakan metode desain yang efektif berdasarkan hukum fisika. Sebuah benda jika dimasukkan sebagian atau seluruhnya ke dalam fluida, maka fluida akan memberikan gaya ke atas pada benda tersebut dengan berat yang sama dengan fluida yang dipindahkan. Kapal udara menggabungkan tiga komponen gaya, yaitu static bouyancy, aerodynamic lift, dan vector thurst. Ketiga gaya tersebut dipadukan sehingga menghasilkan total lift pada kapal udara.

Gaya angkat yang terjadi disebabkan oleh adanya perbedaan densitas antara gas dengan udara. *Principle Lift* (PL) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (1). Berat pada kapal udara memiliki beban yang setara dengan daya apung statis, desain maksimumnya dapat ditambah bobot tambah apapun yang dapat dibawa oleh gaya angkat dinamis yaitu didistribusikan ke amplop dan *empennage* dengan cara yang dapat diterima atau dengan gaya dorong vektor. Ukuran *hull* pada kapal udara dipertimbangkan dengan gaya apungnya, yang menghitung massa total dari kapal udara pada persamaan 16.

$$M_{tot} = M_p + M_s + M_b + M_k + M_E \quad (16)$$

dengan M_p merupakan massa sistem propulsi, M_s merupakan massa struktur, M_b merupakan massa ballons, M_k merupakan massa komersial payload, dan M_E merupakan massa sistem energi. Sedangkan total berat dapat ditentukan dengan persamaan 17.

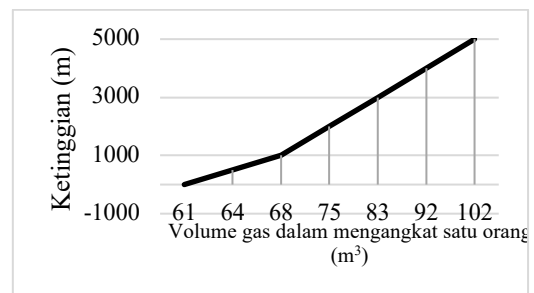
$$W_{tot} = W_p + W_s + W_b + W_k + W_E \quad (17)$$

dengan W_p merupakan berat sistem propulsi, W_s merupakan berat struktur, W_b merupakan berat ballons, W_k merupakan berat komersial payload, dan W_E merupakan berat sistem energi.

Tabel 2. Beban massa pada kapal udara.

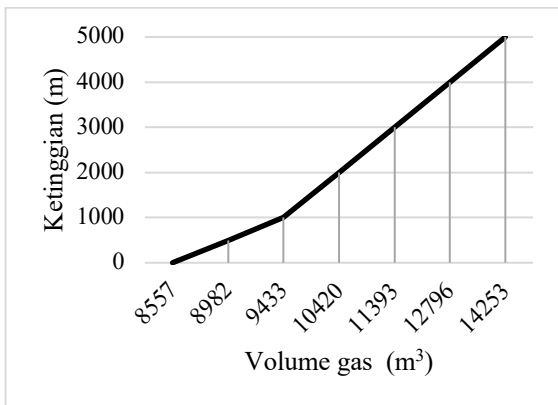
Massa	Nilai (Kg)
Propulsive system (Mp)	286
Structure (Ms)	3000
Ballons (Mb)	2000
Komersial Payload (Mp)	2800
Kargo (Mk)	800
Energy system (ME)	877,6

Berdasarkan **Tabel 2**, yang memberikan informasi mengenai beban massa pada kapal dengan menggunakan persamaan 16 didapatkan massa total sebesar 9764 Kg atau 10 tons. Kombinasi yang tepat dari massa total, berat statis dan ringan serta pusat gravitasi dalam kisaran kondisi pembebanan yang mungkin terjadi sangat diperhatikan selama operasi [26]. Volume gas yang menempati ballon, serta gaya apung gas, tergantung pada ketinggian dan temperature udara. Sehingga volume gas dapat dihitung dengan menggunakan pendekatan persamaan 13, dengan memperhatikan variabel *International Standard Atmosphere* (ISA). Volume gas yang dihasilkan memiliki nilai yang berbeda tergantung dengan ketinggian yang dicapainya. Dalam perancangan kapal udara sebagai moda transportasi massal, melakukan pendekatan dengan massa setiap penumpang adalah 70 kg, sehingga dibutuhkan volume gas yang berbeda untuk mengangkat satu orang dalam ketinggian tertentu.



Gambar 4. Volume gas untuk angkat satu orang pada ketinggian operasi yang berbeda-beda

Berdasarkan **Gambar 4**, digambarkan bahwa volume untuk mengangkat satu orang dengan asumsi per-orang dengan massa 70 kg, semakin tinggi ketinggian operasi kapal udara, didapatkan volume yang semakin besar. Perubahan ini disebabkan perbedaan densitas yang dihasilkan antara gas hidrogen dengan udara. Perubahan densitas yang terjadi didapat dari setiap ketinggian dengan melihat tabel referensi *International Standard Atmosphere*. Sehingga apabila kapal udara dengan jangkauan terbang semakin tinggi, akan mengalami pembebanan yang besar ditambah dengan kapasitas kargo yang tersedia dan komponen lainnya. Dengan pendekatan persamaan 13 didapatkan volume angkat per-orang pada ketinggian operasional 1640 ft sebesar 102 m³.



Gambar 5. Volume gas dalam mengangkat beban total pada ketinggian operasi yang berbeda-beda

Sedangkan volume gas angkat yang dihasilkan dengan pendekatan persamaan 13 adalah digambarkan pada **Gambar 5**. Volume gas yang menempati ballon pada kapal udara dapat dijadikan sebagai gambaran dari volume total dengan kapasitas penumpang dan kargo serta komponen-komponen pembebanan lainnya. Dengan ketinggian operasional kapal udara 500 m atau 1640 ft didapatkan volume sebesar 8982 m³. Dalam perancangan konseptual desain, ketinggian operasional kapal udara sangat dipertimbangkan, penambahan atau peningkatan ketinggian yang dimiliki kapal udara sangat berdampak pada volume kapal udara yang dibutuhkan dalam

mempertahankan keadaan saat terbang [27].

Komponen gaya yang bekerja pada kapal udara, terdiri dari komponen gaya vertikal dan komponen gaya horisontal. Pada tinjauan komponen gaya vertikal terdiri dari gaya angkat kapal udara dengan arah vektor ke atas (F_{Lift}), gaya berat (W) dan gaya hambat (F_{dv}). Sedangkan tinjauan komponen horisontal terdiri dari gaya dorong (F) dan adanya gaya hambat horisontal (F_{dh}) yang memiliki arah berlawanan dengan gerakan kapal udara. Gaya angkat pada kapal udara didasarkan pada prinsip Archimedes, bahwa berat benda dalam suatu fluida akan sama dengan berat benda yang dipindahkan. Adanya keadaan massa jenis udara dan suhu pada setiap ketinggian berubah, maka besar gaya angkat pada kapal udara akan mengalami perubahan. Berdasarkan **Tabel 3**, menggambarkan bahwa gaya apung yang dihasilkan dari setiap ketinggian akan memiliki nilai yang sama dengan berat total yang dimiliki oleh kapal udara. Perhitungan menentukan gaya apung pada kapal udara, digunakan standar perubahan ISA dalam menentukan kondisi udara pada setiap tingkatan ketinggian operasi kapal udara.

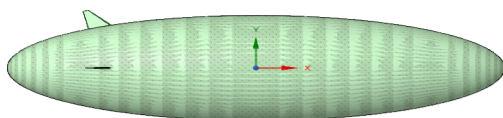
Tabel 3. Gaya apung kapal udara pada setiap ketinggian.

Ketinggian (m)	Volume gas (m ³)	Perbedaan massa jenis gas dan udara (kg/m ²)	Gaya apung (N)
h	V	$\Delta\rho$	F_y
0	8557	1,1410	97636
500	8982	1,0870	97636
1000	9433	1,0350	97636
2000	10420	0,9370	97636
3000	11393	0,8570	97636
4000	12796	0,7630	97636
5000	14253	0,6850	97636

Komponen gaya vertikal terdiri dari gaya angkat pada kapal udara dikurangi dengan berat beban dan gaya gesek, dengan mensubstitusikan nilai F_y dan F_{ay} masing-masing dengan persamaan 6 dan 7 yang dapat digambarkan pada persamaan 8. Total berat kapal udara didefinisikan sebagai W dimana massa total kapal udara dikalikan dengan percepatan gravitasi. Kapal udara akan mengalami dua kondisi, yaitu kondisi transisi dan kondisi steady. Pada kondisi transisi memiliki nilai gaya yang bekerja sebanding dengan massa dan percepatan, yang menunjukkan resultan gaya lebih dari nol.

Sedangkan pada kondisi steady nilai resultan gaya sama dengan nol, yang menunjukkan terjadi dalam kesetimbangan gaya, kondisi transisi didefinisikan dengan memperhatikan variabel massa, volume, percepatan gravitasi, koefisien drag dan luasan yang merupakan variabel bernilai relatif konstan untuk tingkatan ketinggian yang dituju. Perubahan ketinggian yang terjadi dapat mengacu pada perpindahan longitudinal aerostatis karena adanya hambatan angin, sehingga perlu adanya optimalisasi profil, semakin panjang tambatan, maka semakin besar bobotnya. Adanya optimalisasi sub-ruang bersamaan berdasarkan perkiraan permukaan dalam menentukan konseptual desain kapal udara ketinggian tinggi^{[28][29][30]}. Berdasarkan nilai ISA ditunjukkan bahwa tekanan yang bekerja memiliki nilai yang berbeda-beda, tekanan yang dihasilkan kapal udara dengan kecepatan 130 km/jam pada ketinggian 1640 ft sebesar 9185 N/m².

3.2 Rancangan konseptual desain



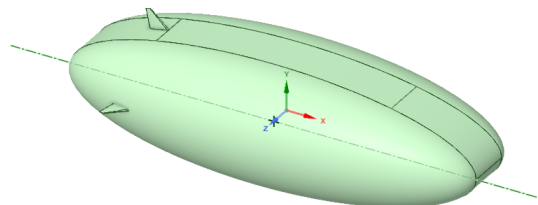
Gambar 6. Rancangan desain konseptual envelope kapal udara

Pada **Gambar 6** menunjukkan gambaran dimensi kapal udara dengan properti dimensi ditunjukkan pada tabel 4.

Tabel 4. Dimensi kapal udara

Dimensi	Nilai (m)
Tinggi	13
Lebar	18
Panjang	46

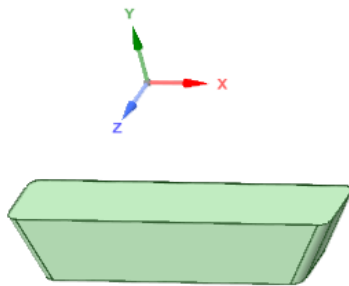
Dimensi yang ditentukan pada kapal udara disesuaikan dengan lokasi mobilisasi dan lingkungan operasional, dengan basis data menggunakan referensi dimensi kapal udara Airlander 10^[31]. Bentuk envelope kapal udara berpengaruh terhadap gaya hambat yang bekerja pada kapal udara. Berdasarkan persamaan 6, dengan nilai cd 0,04, A 469,43 m², Densitas pada ketinggian 1640 ft sebesar 1,087 kg/m³, dengan kecepatan 130 km/jam atau 36,1 m/s. Didapatkan nilai *drag* sebesar 13300 N. Besar nilai *drag* dipengaruhi oleh variabel kecepatan, luasan, dan massa jenis. Nilai *drag* akan mengalami pertambahan seiring dengan pertambahan ketinggian. Tekanan yang bekerja mengalami perubahan dengan kepada adanya pengaruh perubahan massa jenis udara dengan gas hidrogen sebagai gas penggerakannya. Kecepatan maksimum yang diterapkan adalah 130 km/jam dengan 75% dari kemampuan kapal udara. Perubahan ketinggian akan mempengaruhi perubahan tekanan dengan pengaruh perubahan densitas, sehingga desain konseptual memperhatikan tekanan yang ada.



Gambar 7. Desain kapal udara dengan gaya horizontal yang berlaku

Daya horizontal yang berlaku berdasarkan pendekatan persamaan 9 didapatkan sebesar 229053 Nm/s. dengan mempertimbangkan daya dorong mesin sebesar 242352 Nm/s atau 325 hp (239 kw). Gaya dorong mesin yang dihasilkan dengan menggunakan mesin thielert centurion yang merupakan mesin pesawat

siklus diesel untuk penerbangan umum. Mesin centurion yang digunakan adalah centurion 4.0. mesin ini merupakan jenis mesin piston diesel empat langkah 8 silinder, memiliki perpindahan 3996 cm³. Dilengkapi dengan injeksi langsung tekanan tinggi common rail, 2 turbocharger, gearbox dengan rasio reduksi 1:1.689, pengatur baling-baling dan FADEC. Mesin ini memiliki berat kering sebesar 286 kg. Disamping itu mesin ini Mesin dilengkapi dengan Kontrol Mesin Digital Otoritas Penuh (FADEC), P/N 02-7610-55003R1 atau lebih baru standard yang disetujui [32].



Gambar 8. Rancangan desain gondola pada kapal udara.

Berdasarkan **Gambar 8** dan perhitungan aerostatic yang dilakukan gondola yang dirancang proses penentuannya dilakukan dengan memperhatikan kapasitas penumpang dan komersial payload yang diterapkan, dengan pertimbangan regulasi kapal udara [26]. Gondola yang dirancang dapat memuat kurang lebih 40 penumpang dengan pendekatan massa setiap orang sebesar 70 kg dan muatan barang sebesar 800 kg. Adapun dimensi gondola ditunjukkan pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Dimensi gondola

Dimensi	Nilai (m)
Tinggi	4
Lebar	2
Panjang	11

Dari hasil konseptual desain pada kapal udara maka didapatkan hasil spesifikasi lengkap rancangan konseptual desain yang secara terperinci ditunjukkan pada **Tabel 6**.

Tabel 6. Spesifikasi kapal udara

Properti	Nilai	
Volume envelope	8982 m ³	1640 ft ³
Panjang	46 m	151 ft
Lebar	18 m	59 ft
Tinggi	13 m	43 ft
Ketinggian	Maks. 609 m	Max 2000 ft
Kecepatan	Max. 130 km/jam	Max. 70, knots
Berat total	9763,6 Kg	21525 lbs
Kapasitas payload	Max. 5.700 kg	12566,35 lbs

IV. KESIMPULAN

Keadaan kemacetan di wilayah Jakarta menjadikan salah satu permasalahan yang ada. Keberadaan transportasi massal yang ada saat ini dengan medan operasi di darat justru menjadi salah satu penyebab kemacetan. Adapun kesimpulan dari penelitian ini diantaranya.

1. Penelitian ini memberikan kajian desain moda transportasi massal dengan medan operasi udara, yang mampu menjadi solusi dari adanya kemacetan yang terjadi.
2. Kapal udara dirancang dengan kapasitas 40 orang, envelope di desain dengan volume 8982 m³ pada ketinggian 1640 feet dan dapat mengangkat beban sebesar 10 tons. Dimensi ballon memiliki tinggi 13 m, lebar 18 m, dan panjang 46 m. Kemudian gondola yang rancang dengan dimensi tinggi 4 m, lebar 2 m, dan panjang 11 m. Dengan ketinggian operasi 1640 feet, kecepatan 130 km/jam.

V. DAFTAR REFERENSI

- [1] BPS, "Jumlah Penduduk Provinsi DKI Jakarta Menurut Kelompok Umur dan Jenis Kelamin 2019-2021," Jakarta, Indonesia, 2022. [Online]. Available: <https://jakarta.bps.go.id/indicator/12/111/1/jumlah-penduduk-provinsi-dki-jakarta-menurut-kelompok-umur-dan-jenis-kelamin.html>

- [2] V. B. Kusnandar, "Jakarta Pusat Jadi Wilayah Terpadat di Ibu Kota per Juni 2022," *Databoks*, 2022. [https://databoks.katadata.co.id/data/publish/2022/10/09/jakarta-pusat-jadi-wilayah-terpadat-di-ibu-kota-per-juni-2022#:~:text=Secara keseluruhan%20 luas wilayah Provinsi,juta jiwa pada Juni 2022.](https://databoks.katadata.co.id/data/publish/2022/10/09/jakarta-pusat-jadi-wilayah-terpadat-di-ibu-kota-per-juni-2022#:~:text=Secara%20keseluruhan%20luas%20wilayah%20Provinsi,juta jiwa pada Juni 2022.) (accessed Apr. 03, 2023).
- [3] BPS, "Jumlah Kendaraan Bermotor Menurut Jenis Kendaraan (unit) di Provinsi DKI Jakarta 2019-2021," Jakarta, 2022. [Online]. Available: <https://jakarta.bps.go.id/indicator/17/786/1/jumlah-kendaraan-bermotor-menurut-jenis-kendaraan-unit-di-provinsi-dki-jakarta.html>
- [4] N. Octaviani, S Najid, "Pengaruh Penerapan Erp Terhadap Waktu Tempuh Feeder Dan Waktu Tempuh Perjalanan Ruas Jalan Gatot Subroto," *MTS J. Mitra Tek. Sipil*, vol. 3, no. 4, p. 951, 2020.
- [5] F. A. Quinta and H. B. S. E. Prakoso, "Kajian Pemanfaatan Moda Transportasi Kereta Rel Listrik (Krl) Commuter Line Dalam Pergerakan Komuter Bekasi-Jakarta," *Univ. Gadjah Mada*, pp. 1–10, 2016.
- [6] I. Syafei and L. B. Said, "Analisis Persepsi Kepuasan Pengguna Transportasi Udara pada Bandar Udara Sultan Hasanuddin Kota Makassar," vol. 02, no. 01, pp. 21–28, 2022.
- [7] M. L. Levitt, *Airship Operations During World War II*. Florida: Florida Atlantic University, 1982.
- [8] A. D. Gultom and D. Yuniarti, "Kajian Teknologi High Altitude Platform (HAP) [Study of High Altitude Platform (HAP) Technology]," *Bul. Pos dan Telekomun.*, vol. 14, no. 1, p. 11, 2016, doi: 10.17933/bpostel.2016.140102.
- [9] P. Purwadi, F. Sunarto, A. Muttaqin, and T. H. Seto, "Aplikasi Mobile Zappeline Sebagai Media Teknologi Modifikasi Cuaca (Tmc) Dan Penipisan Polutan Udara (Asap)," *J. Sains Teknol. Modif. Cuaca*, vol. 15, no. 2, p. 57, 2014, doi: 10.29122/jstmc.v15i2.2671.
- [10] M. Manikandan and R. S. Pant, "Progress in Aerospace Sciences Research and advancements in hybrid airships — A review," *Prog. Aerosp. Sci.*, no. January, p. 100741, 2021, doi: 10.1016/j.paerosci.2021.100741.
- [11] L. Liao and I. Pasternak, "A review of airship structural research and development," *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 45, no. 4–5, pp. 83–96, 2009, doi: 10.1016/j.paerosci.2009.03.001.
- [12] J. W. Lancaster, "FEASIBILITY STUDY VOLUME III - APPENDICES," 1975.
- [13] L. Zhang, M. Lv, J. Meng, and H. Du, "Conceptual design and analysis of hybrid airships with renewable energy," vol. 0, no. 37, pp. 1–16, 2017, doi: 10.1177/0954410017711726.
- [14] R. Cross, "Aerodynamics of a Party Balloon," *Phys. Teach.*, vol. 45, no. 6, pp. 334–336, 2007, doi: 10.1119/1.2768686.
- [15] T. Michele *et al.*, "Constructal Design For Efficiency : The Case Of Airship Design," pp. 1–12, 2013.
- [16] Q. Wang, J. Chen, G. Fu, and D. Duan, "An approach for shape optimization of stratosphere airships based on multidisciplinary design optimization *," vol. 10, no. 11, pp. 1609–1616, 2009, doi: 10.1631/jzus.A0820814.
- [17] L. Ping and X. L. Wang, "Aerodynamic characteristics of airship Zhiyuan-1 Aerodynamic Characteristics of Airship Zhiyuan-1," no. December 2013, 2018, doi: 10.1007/s12204-013-1443-9.
- [18] B. . A. De YOUNG, "The Calculation of the Total and Skin Friction Drags of Bodies of Revolution at Zero Incidence," pp. 51–70, 1939.
- [19] T. Lutz And S. Wagner, "Drag Reduction And Shape," pp. 1–11,

- 1997.
- [20] A. Nakayama and V. C. Patel, "Calculation of the Viscous Resistance of Bodies of Revolution," vol. 8, no. 4, pp. 154–162, 1974.
- [21] I. Madmud, "Istiaq - Modern Airship Design Using CAD and Historical Case Studies," no. May, 2015, [Online]. Available: <https://www.sjsu.edu/ae/docs/project-thesis/Istiaq.Mahmud-S15.pdf>
- [22] A. José and N. Marques, "Conceptual Design of a Hybrid Airship," 2014.
- [23] M. Manikandan, E. Vaidya, and R. S. Pant, "Design and analysis of hybrid electric multi-lobed airship for cargo transportation," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 51, no. December 2021, p. 101892, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2021.101892.
- [24] Britannica, "Charles's Law," *Encyclopædia Britannica*, 2021. <https://www.britannica.com/science/Charles-law> (accessed Dec. 18, 2022).
- [25] M. Cavcar, "The International Standard Atmosphere (ISA)," pp. 1–7, 1952.
- [26] Rijksluchtvaartdienst, S. & Luftfahrt-Bundesamt, and Hermann-Blenk-Strasse, "Transport Airship Requirements," 2000.
- [27] J. B. Mueller and M. A. Paluszek, "Development of an Aerodynamic Model and Control Law Design for a High Altitude Airship," no. September, pp. 1–17, 2004.
- [28] H. Liang, M. Zhu, and X. Guo, "Conceptual Design Optimization of High Altitude Airship in," no. January, pp. 1–17, 2012.
- [29] S. M. Kale, P. Joshi, and R. S. Pant, "A generic methodology for determination of drag coefficient of an aerostat envelope using CFD," pp. 1–16.
- [30] C. V. R. and R. S. Pant, "Engineering Notes," vol. 47, no. 3, pp. 1073–1076, 2010, doi: 10.2514/1.46744.
- [31] Anonim, "Airlander 10 Technical Data," no. August, p. 2012, 2012.
- [32] EASA, "TYPE-CERTIFICATE," 2019.