

Iiro Kallioinen

**ILMAA KEVYEMMÄT LENTOLAITTEET –  
AEROSTAATIT JA NIIDEN KÄYTTÖSO-  
VELTUVUUS TUTKIMUSTYÖSSÄ SEKÄ  
ENERGIANTUOTANNOSSA**

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Toukokuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Iiro Kallioinen: Ilmaa kevyemmät lentolaitteet – Aerostaatit ja niiden käyttösoveltuvuus tutkimustyössä sekä energiantuotannossa

Lighter-than-air flight devices – Aerostats and their aptitude towards scientific research and energy production

Tampereen yliopisto

Konetekniikka

Kandidaatintyö

Toukokuu 2022

---

Ilmailu on logistiikan ja matkustamisen kannalta yksi tärkeimmistä aloista. Tässä työssä käsitellään ilmaa kevyempiä lentolaitteita eli aerostaatteja ja niiden soveltuvuutta erilaisessa tutkimustyössä sekä energiantuotannossa. Lisäksi työssä tutustutaan aerostaattien historiaan, nykypäivän tilanteeseen sekä syihin, miksi niiden kehitys hidastui merkittävästi 1900-luvulla.

Työ on toteutettu kirjallisuustutkimuksena. Työssä käydään läpi aerodynamiikan perusteita sekä yksinkertaisen aerostaatin toimintaperiaatteet, jonka jälkeen käsitellään aerostaattien historiaa 1700–1900-luvuilla sekä niiden nykyaikainen tilanne. Tämän jälkeen työssä on tutkittu aerostaattien sovelluksia tutkimustyössä, johon lukeutuu erilaiset ilmakehän tutkimusta varten laukaistavat pallot ja ilmalaivat sekä ilmailurobotiikka, jossa simuloidun dynaamisen mallin avulla saadut ohjausparametrit siirretään fyysiseen ilmalaivaan saavuttaen autonomisen ohjattavuuden. Lopuksi työssä tutustutaan mahdollisiin energiantuotannon aerostaattisiin sovelluskohteisiin aurinkoenergiaa hyödyntäen.

Työstä ilmenee aerostaattien kehityksen pysähtyminen 1900-luvulla, nykypäivän ilmaston lämpenemis- ja energianlähdeongelmien aiheuttama kehityksen jatkuminen sekä aerostaattien tehokkaampi resurssikäyttö verrattuna ilmaa raskaampiin lentolaitteisiin. Aerostaatit mahdollistavat ekologisempia lentolaitteita käytettäväksi alueille ja korkeuksille, joille muilla lentolaitteilla ei pääse.

Työssä havaitaan, että aerostaattiset sovellukset kärsivät vielä toistaiseksi fyysisistä ja taloudellisista rajoitteista, joihin kuuluu rakenteellisia ja resurssipohjaisia ongelmia. Suurimmat rajoittavat tekijät kehityksen kannalta ovat aerostaattien kyky toimia pitkällä aikavälillä rajoitetun resurssisen kuormamäärän takia, itse lentolaitteiden koko ja aerostaattisten sovellusten kehittämiseen sekä tutkimukseen kohdistuvan rahoituksen vähäisyys. Työssä havaitaan rahoitusongelmien ratkeavan osittain jatkuvasti kehittyvän simuloinnin avulla, jolla suurten tutkimuslaitosten, kuten tuulitunnelien, välttämättömyys vähenee.

Avainsanat: ilmaa kevyempi lentolaite, aerostaatti, ilmalaiva, tutkimuskäyttö, energiantuotanto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	4
2. AEROSTAATTI JA AEROSTATIikka .....	5
2.1 Kaasu suljetussa tilassa .....	6
2.2 Aerostatiikan peruslaki .....	6
2.3 Arkhimedeen laki ja aerostaatit .....	7
2.3.1 Kuuma- ja kaasuilmapallo .....	8
3. AEROSTAATTIEN HISTORIA JA NYKYPÄIVÄINEN KÄYTTÖ .....	10
3.1 Ensimmäiset aerostaatit ja niiden kehitys 1700–1921-luvuilla .....	11
3.2 Nykyaikainen aerostaatti ja hybridi ilma-alus .....	11
4. AEROSTAATIT TUTKIMUSKÄYTÖSSÄ SEKÄ ENERGIAN TUOTANNOSSA ....	14
4.1 Aerostaatit ilmakehän ja ulkoavaruuden tutkimustyössä .....	14
4.1.1 Pseudosatelliitit .....	16
4.2 Ilmailurobotiikka .....	17
4.3 Energiatuotanto, HAPS ja aurinkovoima .....	18
5. YHTEENVETO .....	20
LÄHTEET .....	22

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

HAPS	korkealla sijaitsevat alustat, Pseudosatelliitti (engl. High Altitude Platforms or Pseudo-Satellites)
ISA	kansainvälinen standardi ilmakehä (engl. International Standard Atmosphere)
MAAT	useampirakenteinen kehittynyt rahti-ilmaläiva (engl. Multibody Advanced Airship for Transport)
PSH	aurinkoenergian huipputunnit (engl. peak solar hours)
kg	kilogramma
F	voima
$g$	putoamiskiihtyvyys
$m$	massa
N	noste
$p$	paine
S	pinta-ala
W	paino
$\gamma$	tilavuuspaino
$\rho$	tiheys

# 1. JOHDANTO

Lentolaitteiden aiheuttamat ympäristövaikutukset ilmaston kannalta ovat merkittävät. Ilmailu itsessään on kokonaisuudessaan aiheuttanut noin 4 % ilmaston lämpenemisestä hiilidioksidipäästöillään ja vuosittaisista päästöistä se aiheuttaa 2,4 %. Ilmailun aiheuttama ilmaston lämpeneminen viimeisen 25 vuoden aikana vastaa noin 0,25 °C-astetta. (Klöwer *et al.* 2021)

Päästöt, jotka ilmastonmuutosta edistävät, koostuvat ilmaa raskaampien lentokoneiden päästöistä ja jättövanoista (engl. contrails). Lentolaitteista ekologisimmat ovat aerostaatteja eli ilmaa kevyempiä lentolaitteita. Aerostaatteihin lukeutuvat esimerkiksi kuumailmapallot ja ilmalaivat (zeppeliini).

Tämän kandidaatintyön taustalla on kiinnostus aihetta kohtaan, sillä aerostaattien merkitys oli suuri 1900-luvun nykyaikaisen ilmailun kehittymisen sekä synnyn kannalta. Tutkimuksen tarkoituksena on kirjallisuusselvityksellä tutkia, mitkä ovat kyseisten ilmaa kevyempien lentolaitteiden sovellusmahdollisuudet tutkimustyössä ja energiantuotannossa. Työn rajaukseen lukeutuu näiden lisäksi aerostaattien historian käsittelyä. Tutkimusongelmana työssä on selvittää ja esitellä aerostaateille mahdollisia sovelluskohteita tutkimustyössä ja energiantuotannossa.

Nykypäivänä aerostaatteja hyödynnetään muun muassa ilmakehä tutkimuksissa ja rahtikuljetuksissa (esim. säöpallot ja rahti-ilmalaivat). Aihe on tutkimisen arvoinen, sillä aerostaatti on lentolaitteista edelleen ympäristöystävällisin vaihtoehto tuottaen vähiten ympäristölle haitallisia sivutuotteita. Tutkittavia kohteita työn kannalta ovat muun muassa hybridi-ilmalaivat (Manikandan & Rajkumar 2021), ilmailurobotiikan aerostaattiset sovellukset (Zufferey *et al.* 2006), uusiutuvan energian hyödyntäminen ilmalaivoissa (Bonnici *et al.* 2013) sekä aerostaattisia ominaisuuksia hyödyntävät, korkealla sijaitsevat pseudosatelliitit (Gonzalo *et al.* 2018).

Työn rakenne sisältää johdantoluvun lisäksi toisessa luvussa käsiteltävän teoreettisen osuuden aerostatiikasta ja työn kannalta merkittävien aerostaattien toimintaperiaatteiden läpikäyntiä (Georgantopoulou & Georgantopoulos 2018), johon sisältyy myös virtausopin suppeaa käsittelyä (Durst, 2008). Kolmannessa luvussa käsitellään aerostaattien historia tiivistetysti vuosina 1709–1921 (Anderson, *et al.* 2009) sekä niiden nykyaikainen käyttö. Neljännessä ja viidennessä luvussa tarkastellaan aerostaattien mahdollisia tulevaisuuden sovelluskohteita tutkimustyössä sekä energiantuotannossa. Viimeinen eli kuudes luku koostuu yhteenvedosta, jossa työtä käsitellään yleisellä tasolla.

## 2. AEROSTAATTI JA AEROSTATIikka

Aerostaatti on ilma-alus tai lentolaite, joka hyödyntää ilmaa kevyempiä kaasuja noustakseen ilmaan (The Chambers Dictionary 2016). Aerostaatin toiminta perustuu aerostatiikkaan, jonka teoriaosuudella tämä työ pohjustetaan. Kuvassa 1 on esitetty 2000-luvun rahti-ilmalaiva huollettavana hangaarissa.



**Kuva 1.** Rahti-ilmalaiva suuressa hangaarissa. Briesen-Brand, Saksa, 2001. (Anderson, et al. 2009, s. 87)

Georgantopouloun ja Georgantopouloksen (2018, s. 85–86) mukaan aerostatiikkaa käsitellään virtausoppiin perustuvana tieteenhaarana, joka tutkii kokoon puristettua ilmaa ja kaasuja vuorovaikutuksessa putoamiskiihtyvyyden tai jonkin taivaalle kohoavan kappaleen kanssa. Kaasun ja ilman samankaltaisuuden takia kaasulle ominaiset piirteet pätevät myös ilmalle. Aerostaattien kannalta tärkeimmät ominaispiirteet kaasulle ovat suljetussa tilassa kaasumolekyylin levittäytyminen koko tilan mukaisesti, kaasujen täydellinen tilavuuden elastisuus sekä kaasumolekyylin liikkeiden jatkuvuus.

## 2.1 Kaasu suljetussa tilassa

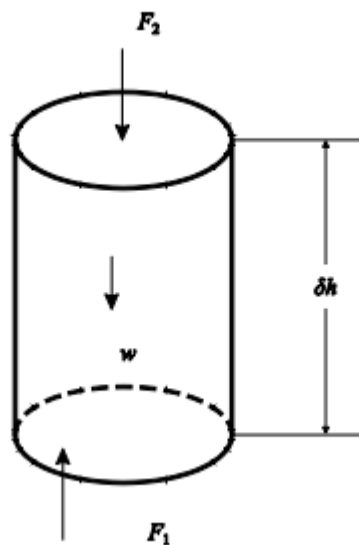
Suljetussa tilassa kaasun molekyylit liikkuvat joka suuntaan ja ovat tämän takia jatkuvassa vuorovaikutuksessa tilan sisäseinämien kanssa. Kaasut levittäytyvät siis tilassa tasaisesti kaikkialle, eli kaasut ovat tilavuudeltaan täydellisen elastinen faasi. Tämän vuorovaikutuksen takia tilan seinämiin muodostuu painetta sekä vertikaalista eli ylöspäin suuntautuvaa voimaa. Kaasumolekyylien levittäytyminen ei kuitenkaan yksinään riitä nostamaan kappaletta ilmaan, vaan tilan sisältämän kaasun tulee olla myös tiheydeltään ilmaa pienempää. Tilan sisäisellä paineella  $p$ , pinta-alalla  $S$  ja kaasun molekyylien liikkeen aiheuttamalla resultanttivoimalla  $\vec{F}$  on tunnettu fysikaalinen yhteys:

$$p = \frac{\vec{F}}{S}. \quad (1)$$

Lisäksi voidaan todistaa, että jos tilan sisältämä kaasu omaa vakiotiheyden koko tilavuutensa halki, niin kaasumolekyylien aiheuttama paine on kaikkialla vakio. (Georgantopoulou & Georgantopoulos 2018, s. 87–88)

## 2.2 Aerostatiikan peruslaki

Käsitellään suljettua sylinterin muotoista tilaa, joka sisältää kaasua, mikä on tasapainossa ja levossa. Sylinteri omaa poikkileikkauspinta-alan  $S_p$  ja korkeuden  $h$ . Sylinteriin vaikuttaa painovoima sen akselin suuntaisesti. Sylinterin pohjalla vallitsee paine  $p_0$  ja sen yläosassa paine  $p_0 + p$ . Koko sylinterin paino on  $W$ . Seuraavassa kuvassa on esitetty kyseinen sylinteri. (Georgantopoulou & Georgantopoulos 2018, s. 93)



**Kuva 2.** Sylinteri, joka sisältää tasapainotilassa olevaa kaasua. (Georgantopoulou & Georgantopoulos 2018, s. 93)

Sylinterin päällisosalle kertyy myös painetta, mutta niitä ei huomioida tasapainotilan vuoksi. Tasapainotilassa resultanttivoima on nolla:

$$F_2 + W - F_1 = 0. \quad (2)$$

Kappaleessa 2.1 esitetyn kaavan (1) mukaan paine voidaan esittää voiman ja pinta-alan avulla. Paino  $W$  voidaan esittää massan ja putoamiskiihtyvyyden kautta sekä edelleen tiheyden, tilavuuden ja putoamiskiihtyvyyden kautta, joten kaava (2) muuttuu siis muotoon

$$(p_0 + p)S_p + \rho Vg - p_0 S_p = 0 \quad (3)$$

$$p + \rho hg = 0, \quad (4)$$

jossa korkeus  $h$  on muuttuva välillä  $[0, \infty]$ . Täten kaava (4) muuttuu muotoon:

$$\frac{dp}{dh} = -\rho g. \quad (5)$$

Kaava (5) osoittaa, että kun neste tai kaasu on levossa, sen paine vaihtelee korkeuden  $h$  mukaan, joka on aerostatiikan peruslaki. (Georgantopoulou & Georgantopoulos 2018, s. 93–94; Durst 2008, s.188–189)

### 2.3 Arkhimedeen laki ja aerostaatit

Georgantopoulou ja Georgantopoulos (2018) määrittelevät teoksessaan, että molekyylien liikkeestä syntyvää resultanttivoimaa kutsutaan myös kappaleen nosteeksi (engl. buoyancy of the body). Noste  $N$  on vertikaalista ja sen numeerinen arvo on yhtä suuri tilassa sijaitsevan kaasun (tai ilman) painon  $W_g$  kanssa. Tätä yhteyttä kutsutaan Arkhimedeen laiksi:

$$N = W_g. \quad (6)$$

Tästä voidaan päätellä kaasun painon olevan hyvin merkityksellinen nosteen suuruuden kannalta. Mikäli siis suljetussa tilassa oleva kaasu ei omaa painoa, se ei aiheuta nostetta. Voidaan myös todeta, että kevyissä rakenteissa (esim. kuumailmapallo) kaasun avulla luotu noste on suuri ja kaasun noste on nesteeseen verrattuna pieni niiden tilavuudellisen painoeron vuoksi. (Georgantopoulou & Georgantopoulos 2018, s. 89)



### 2.3.1 Kuuma- ja kaasuilmapallo

Georgantopoulon ja Georgantopoulouksen (2018, s. 90) mukaan kuumailmapallon toiminta perustuu sen alemman osan  $\sigma$  painon ja vaipan  $\Sigma$  sisältämän kaasun aiheuttaman nosteen väliseen suhteeseen. Vaipan sisältämä noste on suurempi kuin kuumailmapallon alemman osan paino ja vaipan sisältämän kaasun tiheys on pienempi kuin kuumailmapalloa ympäröivän ilman tiheys, jonka takia kuumailmapallo saa nostovoimaa ja kohoaa ilmaan. Kuvassa 3 on esitetty kuumailmapallo.



**Kuva 3.** Kuumailmapallo (Georgantopoulou & Georgantopoulos 2018, s. 91).

Kuumailmapallon vaippa koostuu kaasuja läpäisemättömästä kankaasta tai elastisesta materiaalista. Vaippa täytetään yleensä kuumalla ilmalla, kaasulla, vedyllä tai heliumilla. Vaippaa ympäröivät köydet, joiden päässä on rengas, josta alus roikkuu (Georgantopoulou & Georgantopoulos 2018, s. 91). Mikäli vaippa on täytetty kaasulla kuten vedyllä tai heliumilla, kutsutaan sitä kaasupalloksi. Kaasupallot täytetään yleensä heliumilla, sillä se on ei-syttyvä kaasu. Kaasupalloilla on enemmän nostovoimaa kuin kuumailmapalloilla. (Anderson *et al.* 2009, s. 122)

Kuumailmapallojen alukseen lastataan yleensä mukaan ylimääräistä painoa, kuten hiekka- tai lyijysäkkejä ja painon lisäksi joko koottua tutkimuskalustoa tai matkustajia eli aeronautteja. Kuumailmapallon vaipan suulla on kuvassa 3 merkitty kanaali A, johon on kiinnitetty venttiili, jolla säädellään vaipan sisältämän kaasun tai ilman määrää. Pallon noustessa ilmaan sitä ympäröivä ilmanpaine laskee ja vaipan sisäinen paine kasvaa ulkoista painetta suuremmaksi, jonka takia kaasua poistuu kanaalin kautta. Vaipan sisältämän kaasun paine on siis joka tapauksessa yhtä suuri ulkoisen ilmamehän paineen kanssa. Ilman kanaalia vaippa olisi täysin suljettu, jolloin paine ei tasaantuisi ja pallo

hajoaisi tietyn korkeuden saavuttamisen jälkeen. Tällaisia täysin suljettuja palloja käytetään kuitenkin esimerkiksi korkeissa ilmakehän tutkimuksissa, jolloin kuumailmapalloon lastataan mukaan tarvittava tutkimuskalusto. Kuumailmapallo varustetaan myös tässä tilanteessa laskuvarjolla, joka hidastaa sen putoamista pallon hajoamisen jälkeen. (Georgantopoulou & Georgantopoulos 2018, s. 91; Anderson *et al.* 2009)

Voima, joka saa kuumailmapallon nousemaan, kutsutaan tässä tapauksessa nostovoimaksi  $F$  (resultanttivoima). Muut voimat, jotka kuumailmapalloon vaikuttavat, ovat vastusvoimat, kaasun tai ilman aiheuttama noste  $N$  ja kokonaispaino  $W_{kok} = W_g + W_{kip}$ , jossa  $W_{kip}$  on kuumailmapallon paino ilman kaasua. Vastusvoimia ei tässä tapauksessa huomioida.

$$F = N - W_{kok} . \quad (7)$$

Mikäli  $V$  on kuumailmapallon vaipan (eli pallon) tilavuus,  $\gamma_A$  ilman ja  $\gamma_g$  pallon sisältämän kaasun tilavuuspaino, niin seuraavat suhteet ovat voimassa:

$$N = \gamma_A V , \quad (8)$$

$$W_g = \gamma_g V , \quad (9)$$

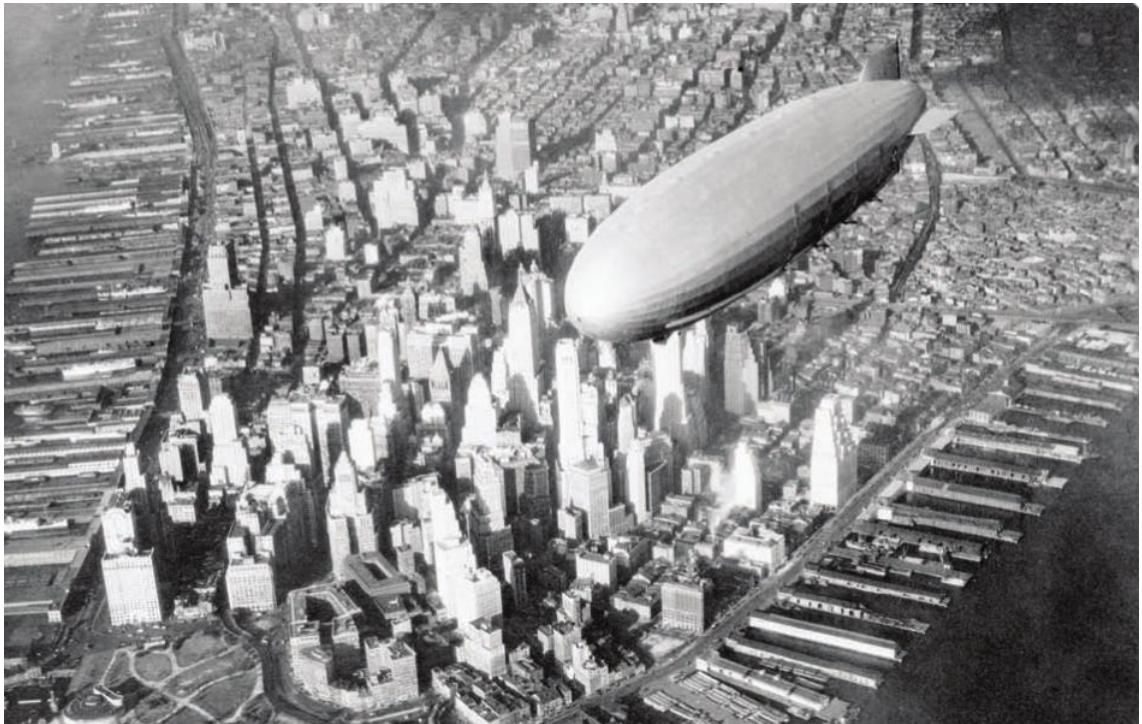
ja kaavojen (7), (8) ja (9) avulla voidaan todeta

$$\begin{aligned} F &= N - (W_g + W_{kip}) , \\ F &= \gamma_A V - (\gamma_g V + W_{kip}) , \\ F &= (\gamma_A - \gamma_g) V - W_{kip} . \end{aligned} \quad (10)$$

Kaavasta (10) voidaan päätellä, että kuumailmapallon noustessa ilmaan sen nostovoima pienenee, sillä myös ilman tilavuuspaino pienenee. (Georgantopoulou & Georgantopoulos 2018, s. 92–93)

### 3. AEROSTAATTIEN HISTORIA JA NYKYPÄIVÄINEN KÄYTTÖ

Ilmaa kevyempien lentolaitteiden kehitys alkoi 1700-luvulla ja hidastui merkittävästi 1900-luvun alussa onnettomuuksien sekä niiden ominaisuuksien takia. Aerostaattien kehittäminen ei ollut sen käyttötarkoituksissa riittävän hyvä vaihtoehtoinen ratkaisu perinteisiin ilmaa painavampiin lentolaitteisiin nähden, koska jälkimmäiset olivat kooltaan pienempiä ja liikkeiltään nopeampia. Ilmaa raskaammilla lentolaitteilla oli myös parempi ohjattavuus sekä tulevaisuuden kannalta kannattavampi kehityskaari. Nämä ominaisuudet osoittautuivat sotien kulun kannalta myös erittäin merkittäviksi. Aerostaattien kehittäminen ei täten vaikuttanut ajallisesti yhtä järkevältä kehityskohteelta. Kuvassa 4 on esitetty heliumkäyttöinen ilmalaiva 1900-luvulta. (Anderson *et al.* 2009, s. 82–87)



**Kuva 4.** 1930-luvulla Yhdysvaltojen laivaston toinen heliumkäyttöinen ilmalaiva (Akron) lentämässä Manhattanin yli New Yorkissa. (Anderson *et al.* 2009, s. 84)

Nykyään aerostaattien käyttö rajoittuu mainontaan, yksityislentoihin ja tutkimus- sekä armeijakäyttöön. Manikandanin ja Rajkumarin (2021) mukaan yhtenä 2000-luvun lupaavimpana aerostaattisena sovelluksena pidetään hybridi ilma-aluksia (engl. hybrid airship), jotka ovat tehokas ilma-alusta useille erilaisille sovelluskohteille. Näihin lukeutuvat esimerkiksi raskaan kuorman kuljetus, kommunikaatio, tieteellinen tutkimus, observaatio sekä ilmakehän valvonta.

Aglietti *et alin* (2008) mukaan nykypäivänä vain pieni osa kaupallisista yrityksistä valmistaa ilmalaivoja tai aerostaatteja, ja suurin osa näistä myydään armeijan käyttöön. Aerostaatit valmistetaan käytännössä mittatilaustuotteina ja niiden ominaisuudet sekä koko vaihtelevat ostavan asiakkaan vaatimusten mukaisesti. Aerostaattien yksilöllisyyden takia on hankala arvioida keskimääräisiä kuluja yhden valmistamiseen, ellei kyseessä ole valvontaan tarkoitettu aerostaatti. Kulujen hahmottamista hankaloittaa myös aerostaatteja rakentavien yritysten yksityisyys.

### 3.1 Ensimmäiset aerostaatit ja niiden kehitys 1700–1921-luvuilla

Ensimmäisen dokumentoidun aerostaatin suunnitteli ja rakensi Bartolomeu de Gusmāon vuonna 1709. Kyseessä oli pieni paperinen ilmapallo, joka kohosi maasta kuuman ilman avulla. Aerostaattien kehitys jatkui merkittävästi vasta vuonna 1783, jolloin veljekset Jacques-Étienne ja Joseph-Michel Montgolfier rakensivat ensimmäisen kuumailmapallon, jolla lennätettiin eläviä olentoja. Samana vuonna François Pilâtre de Rozier ja Marquis d'Arlandes suorittivat ensimmäisen miehitetyn kuumailmapallolennon ja Jacques Charles ensimmäisen vedyllä täytetyn kuumailmapallolennon. (Anderson *et al.* 2009, s. 612)

Anderson *et al.* (2009) teoksen mukaan 1800-luvulla aerostaattien kehityksessä tapahtui suuria teknologisia ja rakenteellisia muutoksia. Näistä merkittävimmät olivat vuonna 1852 Henri Giffardin rakentama ensimmäinen ilmalaiva, vuonna 1884 Charles Renardin ja Arthur Krebsin kehittämä ensimmäinen täysin ohjattava ilmalaiva sekä vuonna 1888 Gottlieb Daimlerin ja Wilhelm Maybachin bensiinimoottoria käyttävä kuumailmapallo.

1900-luvulla aerostaattien kehitys hidastui merkittävästi muiden lentolaitteiden kehittämisen ohella. Vuonna 1900 Ferdinand von Zeppelin rakensi ensimmäisen jäykkärakenteisen ilmalaivan, joka nimettiin zeppeliiniksi. Tämän jälkeen myös muut ilmalaivat nimettiin zeppeliineiksi. Zeppelinin ilmalaivan jälkeen vuonna 1909 ensimmäiset kaupalliset reittilennot ilmalaivoilla alkoivat ja lopulta vuonna 1921 kehitettiin ensimmäinen heliumkäyttöinen ilmalaiva, Goodyear C7. (Anderson *et al.* 2009, s. 613–614)

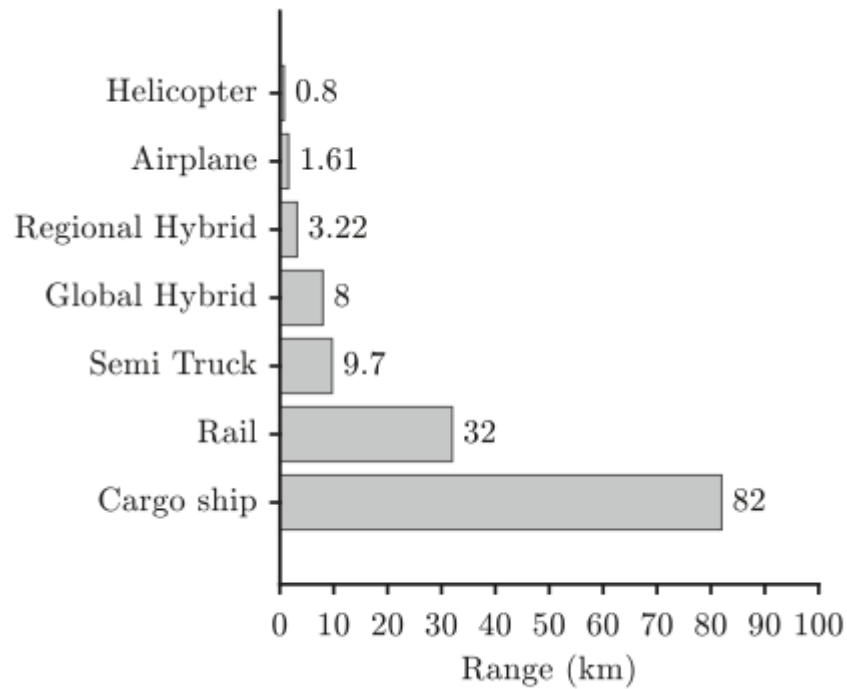
### 3.2 Nykyaikainen aerostaatti ja hybridi ilma-alus

Nykypäivänä ilmastonmuutoksen ja energiatehokkuuden maksimoimisen takia aerostaattien asema saattaa tulevaisuudessa vahvistua, sillä niiden ekologisuus on huomattavasti paremmalla tasolla kuin ilmaa raskaampien lentolaitteiden. Seuraavaksi käsitellään hybridi ilma-alusta, joka on teknologisilta ominaisuuksiltaan aerostaattien nykypäivää.

Manikandanin ja Rajkumarin (2021) tutkielmassa hybridi voidaan pääsääntöisesti luokitella kahdella eri tavalla. Ensimmäinen määritelmä perustuu siihen, että se on kykenevä tuottamaan yli 30 % nousuvoimastaan aerodynaamisella voimalla ja toisena tapana pidetään sen rakennetta. Pääsääntöisesti ilma-aluksat voidaan jakaa kolmeen päätyyppiin niiden vaipan eli rungon perusteella. Nämä päätyypit ovat jäykkä-, puolijäykkä- sekä ei-jäykkärakenteinen. Jäykkärakenteisuus perustuu ilma-aluksen rungon sisältämiin jäykkiin rakenteisiin kangaspäällysteensä alla. Jäykkärakenteinen runko sisältää tukirakenteensa lisäksi myös kaasupusseja, jotka on täytetty nostetta aiheuttavilla kaasuilla.

Ei-jäykkärakenteisen ilma-aluksen vaippa ei sisällä tukirakenteita, vaan vaipan sisus koostuu täysin nostetta aiheuttavista kaasuista ja mahdollisista ilmasäiliöistä. Ilmasäiliöillä säädellään nostetta ylläpitämällä paineen tasapainoa nostetta aiheuttavan kaasun ja ilmanpaineen välillä. Puolijäykkärakenteinen ilma-alus on näiden kahden päätyypin sekoitus.

Hybridi ilma-alusta pidetään edullisena ilmakuljetuksen vaihtoehtona, koska niissä yhdistyy ilmaa kevyempien ja raskaampien lentolaitteiden teknologia. Lentolaitteen toiminnan raskain osuus eli ilmaan nousu suoritetaan aerostaattisten ominaisuuksien avulla, joka parantaa niiden energiatehokkuutta huomattavasti. Kuvassa 5 on esitetty kyseinen energiatehokkuus vertailemalla matkan pituutta, joka kyseisellä polttoainemäärällä voidaan kulkea suurta kuormaa kuljetettaessa. Kuvan kuljetuskoneet ovat seuraavat kuvan mukaisessa järjestyksessä ylhäältä alas: helikopteri, lentokone, regionaalisesti ja globaalisti toimiva hybridilentokone, puoliperävaunuyhdistelmä, rautatieliikenne ja viimeisenä rahti-ilmaläiva. (Manikandan & Rajkumar, 2021)



**Kuva 5.** Tehokkuusvertailu matkallisesti erilaisten kuljetuslaitteiden välillä 10 000 kg:n kuorman siirtymästä noin viiden litran polttoainemäärällä. (Manikandan & Rajkumar 2021, s. 4)

Kuvasta välittyy selkeästi rahtilaivan ylivoimainen energiatehokkuus. Rahti-ilmailaivan ongelmana on logistiikan kannalta sen liikkeiden hitaus. Hybridi ilma-alusten kehittäminen olisi logistiikan tulevaisuuden kannalta tärkeää, koska hyödyntämällä ilmaa kevyempien ja raskaampien lentolaitteiden ominaisuuksia rahtilaivojen logistiikan nykyistä ekologisuutta ja nopeutta voitaisiin parantaa yhtäaikaisesti.

## 4. AEROSTAATIT TUTKIMUSKÄYTÖSSÄ SEKÄ ENERGIANTUOTANNOSSA

Aerostaatteja on hyödynnetty tutkimustyössä kauan. Yleisesti tunnetuimmat sovelluskohteet ovat säöpallot, joiden avulla on kerätty tietoa ilmakehästä, sen käyttäytymisestä sekä sääolosuhteista. Muita sovelluskohteita ovat olleet esimerkiksi muiden planeettojen ilmakehien tutkiminen sekä ilmailurobotiikka.

Tutkimustyön lisäksi aerostaattien energiantuotantomahdollisuudet ovat lupaavat. Nykypäivän ilmasto- ja energialähdeongelmien kannalta ilmaa kevyempien laitteiden merkitys on lisääntynyt. Uusiutuvia energianlähteitä ovat esimerkiksi vesi-, aurinko- ja tuulivoima sekä maalämpö ja biomassa (Giucci 2021). Aerostaattien kannalta näistä oleellisin on aurinkovoima, jota voidaan varastoida aurinkokennoilla. Kennot on mahdollista kiinnittää aerostaatteihin, jotka voivat kerätä aurinkoenergiaa niiden avulla. Sopivia aerostaattisia sovelluksia aurinkovoimalle ovat esimerkiksi korkealla sijaitsevat alustat eli HAPS:it. Kerätessä aurinkokennoista energiaa on tärkeää huomioida aurinkoenergian huipputunnit eli PSH:t (engl. peak solar hours,  $kWh/m^2$ ) (Aglietti *et al* 2008).

Aerostaatit soveltuvat tutkimustyöhön erinomaisesti niiden energiatehokkuuden ja ekologisuuden takia. Sovelluskohteet eivät kuitenkaan aina ole täysin aerostaattisia, vaan omaavat aerostaatin kannalta tärkeimmät ominaisuudet, kuten kaasujen aiheuttaman nosteen hyödyntämisen tietyn korkeuden saavuttamisessa.

### 4.1 Aerostaatit ilmakehän ja ulkoavaruuden tutkimustyössä

Ulkoavaruuden ja planeettojen tutkimustyössä on käytetty useita erilaisia laitteita sekä ajoneuvoja. Tutkimusvälineistä kaasupallot vaikuttavat kuitenkin kaikista yksinkertaisimmilta, sillä ne eivät vaadi minkäänlaisia työntömoottoreita liikkuaan tutkittavan planeetan ilmakehässä pitkiäkin matkoja. Tällaisia kaasupalloja olivat muun muassa Vega-ilmapallot vuonna 1985. (Blamont 2008)

Blamontin (2008) artikkelissa kerrotaan kaasupallojen olevan epästabiileja. Noustuaan ilmaan ne saavuttavat tietyn huippukorkeuden, jossa ilmakehän vertikaalinen lämpötilagradientti on nollassa. Pallolla on nostetta niin kauan, kuin tämä gradientti säilyy negatiivisena ja sen muututtua positiiviseksi pallo aloittaa laskeutumisen, joka päättyy, kun se osuu maahan. Epästabiiliuden ehkäisemiseksi tietyissä olosuhteissa on kehitetty useampia eri pallotyyppisiä. Nämä pallotyyppit ovat laajentuva, super-paineistettu, tasapaineistettu, olomuodonmuutos- sekä kuumailmapallo.

Laajentuva pallo täytetään kaasulla ja sen annetaan nousta, kunnes se räjähtää. Super-paineistettu pallo on tehty ei-laajentuvasta materiaalista, joka on suunniteltu leijumaan stabiilisti sisäisellä paineella, mikä on ympäröivän ilmakehän painetta suurempi. Nousemaan suunnitellulle korkeudelle, super-paineistettu pallo pysyy tällä korkeudella liikkuen esimerkiksi tuulen avulla. Tällaisen pallon halkaisija on rajattu muutamaan metriin, koska sen materiaalin jännitys pinta-alayksikköä kohden kasvaa säteen aiheuttaman kaarevuuden mukana. Super-paineistetun pallon heikkous on sen koko, joka rajoittaa sillä kuljettavan kuorman suuruutta. (Blamont 2008)

Tasapaineistettu pallo omaa sisäisen paineen, joka ei voi ylittää ilmakehän painetta. Nousun aikana tällainen pallo käyttäytyy samalla tavalla kuin super-paineistettu pallo. Pallon saavutettua ilmakehässä vallitsevan paineen, alkaa sen sisältämä kaasu vuotamaan ulos kanavasta, mikä on koko ajan auki. Tasapaineistettu pallo nousee tasapainoasemansa vaaditulle korkeudelle, jolloin nosteen voima on nolla ja pallon paine tasaantuu. Ympäröivä lämpötila vaikuttaa pallon lentokykyyn eniten ja sen kasvaessa kaasua vuotaa ulos niin kauan kuin pallo pysyy täysin täytettynä, kun taas lämpötilan laskiessa tasapaineistetun pallon sisältämä kaasu alkaa supistua, jolloin pallo joutuu pudottamaan painolastia (engl. ballast) pysyäkseen ilmassa. (Blamont 2008)

Blamontin (2008) mukaan olomuodonmuutospallo sisältää nestettä, jonka olomuoto voi vaihdella nesteen ja kaasun välillä tietyllä lämpötilavälillä kondensaatio- tai höyrystymispisteissään. Kondensaatiopistettä korkeammassa lämpötilassa pallolla on nostetta, kun taas sen alapuolella neste on inertti massa. Tällainen pallo voidaan optimoida lisäämällä systeemiin toinen, ei-kondensoituva kaasu, joka antaa pallolle nostetta koko ajan. Viimeinen pallotyyppi, eli kuumailmapallo, käsiteltiin kappaleessa 2.3.1.

Jokaisen pallon kuormaan sisältyy yleensä tutkimuslaitteita, eli esimerkiksi lähettämiä, jotka lähettävät bittidataa. Nämä tutkimuslaitteet ovat myös yleisesti suurimmat energiankuluttajat koko systeemissä, ja niiden energiankulutuksen takia mukaan tulee lastata erilaisia energianlähteitä kuten akkuja. Pallojen toiminnalle rajoittavat tekijät ovat kannettavan kuorman kannalta pallon oma massa ja sen elinkaaren kannalta ei-uusiutumattomat resurssit, eli systeemiä ei voi muuttaa sen ilmakehään laukaisemisen jälkeen. (Blamont 2008)

Blamontin (2008) tutkimuksessa käytyjen erilaisten pallojen käyttösoveltuvuus tutkimuskäytössä on mittavaa. Ilmakehästä voidaan pallojen avulla kerätä dataa sääolosuhteista tai itse ilmakehän koostumuksesta eli esimerkiksi vallitsevan ympäristön paineen suuruus, ilmankosteus tai lämpötiloja eri korkeuksilla. Näitä mitattuja suureita voidaan esimerkiksi verrata kansainväliseen standardi ilmakehään eli ISA:an (engl. International



Standard Atmosphere) tai niitä voidaan käyttää ilmalaivojen rahtikuljetusten optimoimiseen. Aerostaattisten pallojen etu ilmaa painavampiin lentolaitteisiin nähden on niiden kyky nousta huomattavasti korkeammalle ilmakehään (Yajima *et al.* 2009, s. xiii).

#### 4.1.1 Pseudosatelliitit

Pseudosatelliitit eli HAPS:it (engl. High Altitude Platforms or Pseudo-satellites) ovat miehittämättömiä alustoja, jotka hyödyntävät heikkoja stratosfäärisiä tuulia ja aurinkovoimaa toimiakseen. Ne omaavat myös riittävän kestävyuden toimittaakseen paikallisesti pitkä aikaista internet-yhteyttä satelliittien tapaan, eikä HAPS:ien toiminnasta aiheudu häiriötä kaupalliselle lentoliikenteelle. HAPS:ien tarkoitettuihin toimintoihin kuuluu esimerkiksi kommunikaatio, Maapallon observaatio, astronomia ja paikannus. HAPS:ien operaationaalinen korkeus on noin 20 kilometriä maanpinnasta ja niiden toimintaa hyödynnettiin muun muassa Perussa 2017, kun kaupungissa oli tuhoisia tulvia. Pseudosatelliittien avulla alueelle saatiin seitsemäksi päiväksi toimiva internet -yhteys. (Gonzalo *et al.* 2018)

Gonzalo *et alin* (2018) tutkimuksessa pseudosatelliittien toiminnan kerrotaan parantavan, kilpailevan tai jopa syrjäyttävän nykyisten palveluiden laadun, jota erilaiset lentokoneet, satelliitit ja maanpäälliset (engl. terrestrial) verkot tarjoavat. Pseudosatelliittien käyttönotolla voidaan muun muassa pienentää tavallisille GEO-satelliiteille aiheutuvaa ruuhkautumista internet palveluiden tarjoajana ja HAPS:ien avulla 5G-verkon infrastruktuuria voidaan vahvistaa.

Verrattaessa pseudosatelliitteja maanpäällisiin verkkoihin ja satelliitteihin on huomattu esimerkiksi seuraavia eroja: pseudosatelliittien käyttöönotto ja laukaisu on nopeampaa, laitteiston päivittäminen sujuvampaa, ne ovat rahallisesti edullisempia ja tarjoavat pienemmän alueensa vuoksi parempaa signaalia kuin esimerkiksi GEO-satelliitit. Pseudosatelliittien yhteydessä on myös huomattavasti pienempi viive kuin satelliiteilla, vastaten maanpäällisiä verkkoja. (Gonzalo *et al.* 2018)

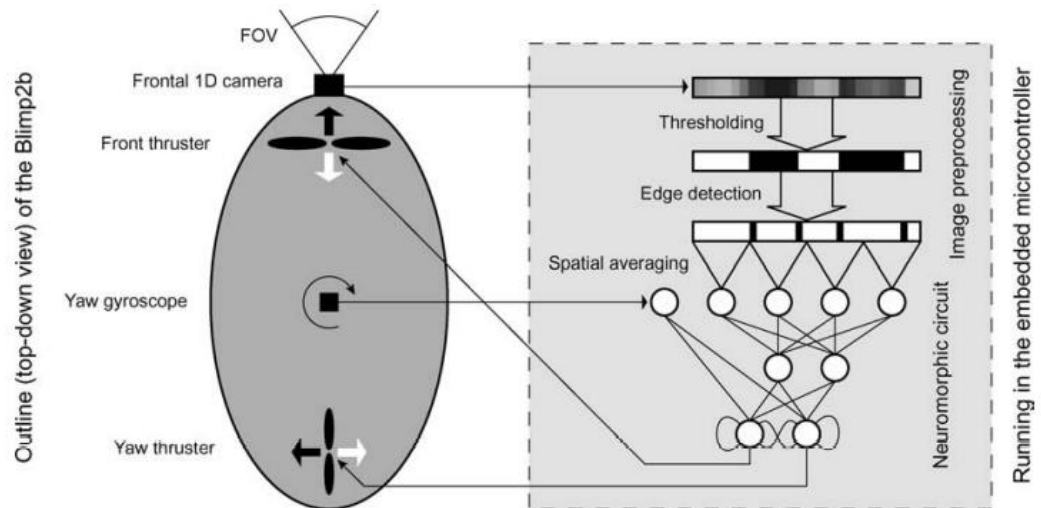
Gonzalo *et alin* (2018) mukaan pseudosatelliittien toimintaa aerostaateissa nykypäivänä rajoittavat laitteiston kulumisen sekä työntävää liikettä (eli propulsiota) aiheuttavien moottorien propellien koko. HAPS:ien koko, erittäin kevyiden materiaalien tuotanto ja energiatehokkuus uusiutuvalla aurinkoenergialla ovat jo tasolla, joka riittää pseudosatelliittien laajempaan käyttöönottoon.

## 4.2 Ilmailurobotiikka

Zufferey *et al.* (2008) tutkielmassa käsitellään itseohjautuvia sisäilmalaivoja. Ilmalaivojen luontainen kyky kohota ilmaan luo ilmailurobotiikan alalle hyvän alustan tutkimustyöhön. Tutkielmassa sovelletaan koneoppimista ilmalaivojen kanssa niin, että ilmalaiva opetetaan ohjaamaan itseään autonomisesti eli ilman ulkoista kontrollointia. Ongelmana ilmalaivoissa on ulkoisen virtalähteen yhdistäminen sekä laivojen pieni mekaaninen vastus painonsa takia, joten tutkielmassa sovelletaan tietokoneistettuja simulaatioita, joista kerätty data siirretään fyysiseen ilmalaivaan. Simulaatiot nopeuttavat koneoppimisprosessia huomattavasti. Kyseinen tutkielma on aiheen kannalta merkittävä, sillä itseohjaavat ilmalaivat olisivat ilmateitse toimivan logistiikan resurssitehokkuuden kannalta erittäin sovelluskelpoinen vaihtoehto. Simulaatio on myös tässä tapauksessa rahallisesti huomattavasti halvempi vaihtoehto, sillä fyysisellä sisäilmalaivalla koneoppiminen vaatisi esimerkiksi suurta tuulitunnelia sekä paljon korjaamisresursseja ja rahoitusta.

Puhuttaessa simulaation ja todellisen kappaleen käyttäytymisestä käytetään termiä ”todellisuusrako” (engl. reality gap). Simulaation toiminta perustuu tutkielmassa (Zufferey *et al.* 2008) esineiden muodon nopeaan ja tarkkaan tunnistuskykyyn. Simulaatiossa käytettiin dynaamista mallia, jonka ohjausparametrit onnistuneen simuloimisen jälkeen siirrettiin oikeaan sisäilmalaivaan. Dynaamisessa mallissa on kiinnitettyinä sensorit, jotka ovat etupuolella sijaitseva 1-dimensioinen kamera sekä keskiosassa oleva gyroskooppianturi, joka kerää mallista inertiaalista tietoa.

Simulaatiossa tulee huomioida esimerkiksi sisäilmalaivaa ohjaavien moottorien työntösuunta, työntötehon suuruus ja aerodynaaminen kosteus, joka aiheutuu ilmanvaihduksesta riippuen ilmalaivan nopeudesta. Kuvassa 6 on esitettyä simulaatiossa käytettyä dynaamisen mallin rakenne.



**Kuva 6.** Vasemmalla on kuvattuna ilmalaivan sensorit (1D-kamera ja gyroskooppi) sekä toimilaitteet (etu- ja takamoottorit) ja oikealla neuraaliverkon rakenne sekä kameran syötöjen esikäsittely. (Zufferey et al. 2008)

Vertaillen simuloidun dynaamisen mallin ja oikean sisäilmalaivan kykyä lentää samantyyppistä rataa varoen esteitä todettiin, että fyysinen ilmalaiva vastasi liikkeiltään dynaamista mallia. Simulaation rakentaminen siis onnistui ja liikeradan ohjausparametrit saatiin onnistuneesti välitettyä fyysiselle ilmalaivalle. (Zufferey et al. 2008)

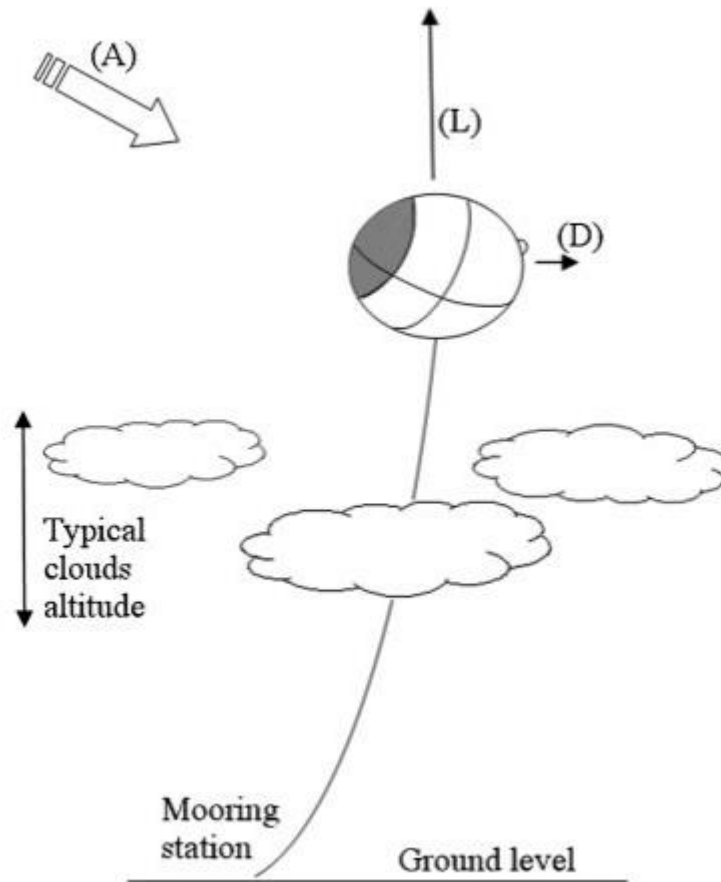
Zufferey et alin (2008) tutkimus oli merkittävä askel todellisuusraon pienentämisessä. Itseohjautuvat ilma-alukset voisivat olla tulevaisuudessa logistiikan kannalta energiatehokkuudeltaan ekologisista ja tarpeellisista suurien kuormien siirrossa useihin paikkoihin, joihin ei nykypäivänä pääse muuta kuin useiden eri kuljetuskanavien kautta.

### 4.3 Energiatuotanto, HAPS ja aurinkovoima

Aglietti et alin (2008) artikkelissa käsitellään HAPS:ien soveltuvuutta aurinkoenergian keräämiseen. Energian keräämistä hyödyttää laitteiston korkea sijainti, sillä auringosta saapuva säteily on korkeammalla ilmakehässä voimakkaampaa, eivätkä pilvet tällöin vaikuta kerätyn energian suuruuteen. Kerätty energia saadaan maahan kyseisen aerostaatin kiinnityskaapelia (engl. mooring cable) pitkin. Tällainen HAPS kykenee keräämään aurinkoenergiaa ja toimittamaan sitä takaisin maahan 12 tunnin ajan joka päivä riippuen sääolosuhteista.

Alusta sijaitsee sääolosuhteitten mukaan 6–9 kilometrin korkeudella. Tämä johtuu siitä, että suurin osa pilvistä sijaitsee erittäin suurella todennäköisyydellä alle 6 kilometrin korkeudella ja ääntä hitaammin lentävät lentoalukset kulkevat 9–13 kilometrin korkeudella.

Kuvassa 7 on esitetty tällaisen alustan sijainti ja toiminta yksinkertaistettuna. (Aglietti *et al.* 2008)



**Kuva 7.** Luonnosmainen rakenne alustasta, jossa harmaa alue edustaa aurinkokennojen kuorta, L nostovoimaa (engl. lifting force), D vastusvoimaa (engl. drag force) ja A auringonsäteilyn suuntaa (engl. solar beam direction). Kuvan alaosassa on kuvattuna aerostaatista lähtevän kaapelin kiinnityspiste maassa. (Aglietti *et al.* 2008)

Korkeuden huippu, jossa kyseinen aerostaattinen alusta voi sijaita, riippuu täysin kiinnityskaapelin pituudesta. Korkeuden pienentäminen onnistuu säätelemällä aerostaatin sisäistä painetta sen vaipan sisällä olevien pienten kaasupallojen (engl. ballonet) avulla nousun tai laskun aikana. Alustan suunnan ohjaus perustuu autonomiseen kahden takaisinkytketyn systeemin toimintaan, joka hallitsee alustan atsimuuttia eli suunnan horisontaalista komponenttia sekä korkeutta. Suunnan ohjaus ei kuitenkaan vaadi äärimmäistä tarkkuutta, sillä  $\pm 5$  asteen virheellisessä kulmassa aurinkokennot kykenevät keräämään 99 % saapuvasta aurinkosäteilystä. (Aglietti *et al.* 2008)

## 5. YHTEENVETO

Aerostaattien toiminta perustuu aerodynamiikkaan, jossa kaasut ovat tärkeimmässä roolissa. Kaasut kuten helium, vety ja kuuma ilma ovat aerostaateille parhaat vaihtoehdot, sillä niiden tiheys on ilmaa pienempi. Kaasut ovat täydellisen tilavuuselastinen faasi, joten suljetussa tilassa ne levittäytyvät tasaisesti kaikkialle aiheuttaen ylöspäin suuntautuvaa voimaa ja täten kappaleelle nostetta. Noste syntyy Arkhimedeen lain mukaan, kun kappaleen paino on yhtä suuri kuin siihen vuorovaikuttava noste. Korkeutta, jossa aerostaatti sijaitsee, säädellään sen sisällä vallitsevan paineen suuruuden avulla ja kaavan (5) mukaan nesteen tai kaasun ollessa levossa suljetussa tilassa niiden paine vaihtelee korkeuden mukaan. Aerostaateista yksinkertaisin elävää olentoa kuljettamaan kykenevä systeemi on kuumailmapallo, jonka toiminta perustuu sen korin ja pallon vaipan nosteen väliseen suhteeseen.

Aerostaattien kehitys alkoi 1700-luvun alussa ja keskeytyi 1900-luvulla, kun ilmaa raskaammat lentolaitteet yleistyivät ja olivat ominaisuuksiltaan yksinkertaisesti suorituskykyisempiä. Nykypäivänä vain pieni osa yrityksistä valmistaa tai kehittää aerostaattisia sovelluksia, mutta ne ovat selvästi yleistymässä vallitsevan ilmaston lämpenemisen sekä uusiutuvien energialähteiden puutteen vuoksi. Aerostaatit ovat ilmailun kannalta kaikista ekologisimpia ja energiatehokkaimpia tarjoten tulevaisuuden logistiikan kannalta parhaan alustan, sillä aerostaateilla voi kuljettaa rahtikuormia paikkoihin, joihin ei muilla kuljetusvälineillä pääse. Nykyajan aerostaattisten sovellusten paras vaihtoehto on hybridi ilma-alus, jossa yhdistyy ilmaa raskaampien ja kevyempien lentolaitteiden ominaisuudet.

Tutkimuskäytössä aerostaattiset pallot ovat olleet käytössä jo pitkään. Tunnetuimmat sovelluskohteet ovat sääpallot ja uudempana alana on ilmailurobotiikan sovellukset. Tutkimuskäytön lisäksi aerostaateilla on erinomaiset mahdollisuudet energiantuotannossa. Aerostaatteihin kiinnitettävillä aurinkokennoilla voidaan kerätä pilvien yläpuolelta vahvemmin auringonsäteilyn tuottamaa energiaa kuin maan tasalla. Tällaisiin aerostaatteihin soveltuu parhaiten HAPS:it eli korkealla sijaitsevat alustat. HAPS:it ovat toiselta nimeltään pseudosatelliitteja, jotka ovat miehittämättömiä aluksia ja ne hyödyntävät liikkuakseen heikkoja stratosfäärisiä tuulia sekä aurinkovoimaa toimiakseen. Pseudosatelliittien toimintaan voi kuulua esimerkiksi Maapallon observaatio, satelliitin palvelut kuten internet-yhteys ja paikannus. Niiden merkittävimmät erot tavallisiin GEO-satelliitteihin ovat käyttöönoton nopeus sekä paikallisempi ja suorituskykyisempi toiminta pienellä alueella.

Aerostaateilla tutkitaan pääosin ilmakehiä. Ilmakehän tutkimukseen soveltuu erilaiset kaasupallot, kuten laajentuva, super-paineistettu, tasapaineistettu, olomuodonmuutos- sekä kuumailmapallo. Palloihin voidaan kiinnittää erilaista tutkimuslaitteistoa, kuten bittilähettä, joilla mahdollista dataa kerätään. Tutkimuslaitteet kuluttavat aerostaateissa eniten energiaa ja sen vuoksi systeemiin on lastattava ylimääräisiä resursseja laitteiden ylläpitoa varten, kuten akkuja. Palloilla kerättyä dataa voidaan soveltaa esimerkiksi ilmakehän tutkimiseen tai rahti-ilmalaivojen kuljetusten optimoimiseen. Tutkimuskäytössä oleville palloille rajoittavat tekijät ovat niiden kuorman suuruus ja ei-uusiutumattomat resurssit. Tämä käytännössä tarkoittaa, että systeemiä ei voida muuttaa sen ilmakehään laukaisun jälkeen.

Tutkimuskäytön lisäksi aerostaattien käyttö ilmailurobotiikassa on tulevaisuuden ilmailualan kannalta tärkeää. Itseohjautuvuus on yleistynyt nykypäivänä sähköisten autojen kanssa ja jo 2008 suoritettu onnistunut itseohjautuvan sisäilmalaiivan simulaatio osoittaa, että autonominen lentoliikenne ei ole enää kaukana tulevaisuudessa. Tällaisesta lentoliikenteestä hyötyisi eniten logistiikan ala, sillä kuljetukset ja niiden reitit saataisiin optimoitua äärimmäisen tarkoin. Tällaisella optimoinnilla voitaisiin myös ennaltaehkäistä onnettomuuksia entistä tehokkaammin.

Viimeisenä käsiteltynä sovelluskohteena on aurinkovoiman hyödyntäminen aerostaattisissa korkealla sijaitsevilla alustoilla eli HAPS:eissa, jotka liikkuvat pääosin pilvien yläpuolella keräten tehokkaammin auringonsäteilyä saatavaa energiaa niihin kiinnitettyjen aurinkokennojen avulla kuin mitä maan tasalla olisi mahdollista. Tällaiset aerostaatit on kytketty maahan kiinnityskaapeleilla, jota pitkin kerätty energia saadaan varastoitua.

Työssä käytiin läpi pintapuolisesti useita eri aerostaattisia sovelluskohteita, joista ilmenee aerostaattien selvä potentiaali nykypäivän ja tulevaisuuden energiantuotannossa sekä tutkimustyössä. Merkittävimmät työssä tutkitut sovellukset energiantuotannon kannalta ovat aurinkoenergian keräämiseen perustuvat HAPS:it ja tutkimustyössä Maapallon ja muiden planeettojen ilmakehien tutkiminen erilaisten aerostaattisten pallojen avulla.

# LÄHTEET

- Aglietti, G. S, Markvart, T., Tatnall, A. R. & Walker, S. J. (2008). *Solar Power Generation Using High Altitude Platforms Feasibility and Viability*, Wiley InterScience.
- Anderson, D., Graham, I. & Williams, B. (2011). *Flight and Motion : The History and Science of Flying*, Taylor & Francis Group. ProQuest Ebook Central, Saatavissa (viitattu 28.1.2022): <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=3569946>.
- Durst, F. (2008). *Fluid Mechanics: An Introduction to the Theory of Fluid Flows*. Springer Berlin / Heidelberg, 2008. Saatavissa (viitattu 28.1.2022): <https://doi.org/10.1007/978-3540-71343-2>.
- Georgantopoulou, G. A. & Georgantopoulos, C. G. (2018). *Fluid Mechanics in Channel, Pipe and Aerodynamic Design Geometries 1 - 3.14 Problems to be Solved*. John Wiley & Sons. Saatavissa (viitattu 28.1.2022): <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011J7YC3/fluid-mechanics-in-channel/aerostatic-problems-be>
- Giucci, M. 2021. Uusiutuvat energianlähteet. Saatavissa (viitattu 15.4.2022): <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/fi/sheet/70/uusiutuvat-energialahteet>
- Gonzalo, J., López, D., Domínguez, D., García, A. & Escapa, A. (2018). On the Capabilities and Limitations of High Altitude Pseudo Satellites. *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 98, Elsevier Ltd, 2018, s. 37–56. Saatavissa (viitattu 28.1.2022): <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.03.006>.
- Klöwer, M., Allen, M. R., Lee, D. S., Proud, S. R., Gallagher, L. & Skowron, A. (2021). Quantifying aviation's contribution to global warming. *Environmental Research Letters*, vol. 16, no. 10, IOP Publishing, p. 104027.
- Manikandan, M. & Rajkumar S. P. (2021). Research and Advancements in Hybrid airships—A Review. *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 127, Elsevier Ltd, 2021, p. 100741. Saatavissa (viitattu 28.1.2022): <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2021.100741>.
- The Chambers Dictionary (2016). Revised 13th Edition., Chambers Harrap Publishers, 2016.
- Zufferey, J.-C., Guanella, A., Beyeler, A. & Floreano, D. (2006). Flying over the Reality Gap: From Simulated to Real Indoor Airships. *Autonomous Robots*, vol. 21, no. 3, Kluwer Academic Publishers, 2006, s. 243–54. Saatavissa (viitattu 28.1.2022): <https://doi.org/10.1007/s10514-006-9718-8>.
- Yajima, N., Izutsu, N., Imamura, T & Abe, T. (2009). *Scientific Ballooning Technology and Applications of Exploration Balloons Floating in the Stratosphere and the Atmospheres of Other Planets*. 1st ed. 2009., Springer New York, 2009. Saatavissa (viitattu 28.1.2022): <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09727-5>.