

BAB II

KAJIAN TEORI

2.1 Urban Air Mobility

Urban Air Mobility (UAM) merupakan konsep sistem transportasi udara yang dirancang untuk melayani mobilitas jarak pendek hingga menengah di kawasan perkotaan dengan memanfaatkan pesawat udara beroperasi pada ketinggian rendah. Konsep ini berkembang sebagai respon terhadap permasalahan perkotaan seperti kemacetan lalu lintas, keterbatasan lahan, serta meningkatnya kebutuhan mobilitas yang cepat dan efisien (NASA, 2020).

UAM diposisikan sebagai bagian dari sistem transportasi terintegrasi yang melengkapi moda transportasi darat dan konvensional. Oleh karena itu, pengembangannya tidak hanya menekankan aspek teknologi penerbangan, tetapi juga keterkaitannya dengan struktur kota, infrastruktur, dan aktivitas perkotaan.

2.1.1 Latar Belakang dan Evolusi Urban Air Mobility

Urban Air Mobility (UAM) berkembang sebagai respon terhadap permasalahan mobilitas di kawasan perkotaan yang semakin kompleks, terutama akibat pertumbuhan penduduk, urbanisasi, dan keterbatasan kapasitas sistem transportasi darat. Perserikatan Bangsa-Bangsa (UN, 2019) mencatat bahwa lebih dari 55% populasi dunia tinggal di kawasan perkotaan, dan angka ini diproyeksikan terus meningkat. Kondisi tersebut menyebabkan tekanan yang signifikan terhadap infrastruktur transportasi perkotaan, khususnya di kota-kota besar.

Seiring dengan kondisi tersebut, ruang udara perkotaan mulai dipertimbangkan sebagai alternatif dimensi baru dalam sistem mobilitas. NASA (2020) mendefinisikan Urban Air Mobility sebagai sistem transportasi udara yang memungkinkan operasi pesawat berukuran kecil, beroperasi pada ketinggian rendah, dan digunakan untuk mendukung mobilitas manusia maupun barang di lingkungan perkotaan. Konsep ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi perjalanan sekaligus mengurangi ketergantungan pada transportasi darat.

Evolusi Urban Air Mobility tidak terlepas dari perkembangan teknologi penerbangan, khususnya pesawat Electric Vertical Take-Off and Landing (eVTOL). Penggunaan tenaga listrik memungkinkan pesawat beroperasi dengan tingkat kebisingan dan emisi yang lebih rendah dibandingkan pesawat konvensional, sehingga lebih sesuai untuk diterapkan di kawasan perkotaan (EASA, 2019). Kemampuan lepas landas dan mendarat secara vertikal juga

menghilangkan kebutuhan akan landasan pacu panjang, yang selama ini menjadi keterbatasan utama bandara konvensional.

Pada tahap awal, konsep UAM banyak dikaji sebagai wacana futuristik. Namun, dalam satu dekade terakhir, UAM mulai memasuki tahap implementasi melalui riset, uji coba, dan pengembangan regulasi. NASA melalui program UAM Grand Challenge telah melakukan serangkaian pengujian untuk mengevaluasi kesiapan teknologi, sistem lalu lintas udara, serta integrasi UAM dengan lingkungan perkotaan (NASA, 2021). Di sisi lain, lembaga penerbangan seperti EASA dan FAA mulai menyusun kerangka regulasi untuk mendukung pengoperasian UAM secara aman.

Qu et al. (2023) menjelaskan bahwa evolusi Urban Air Mobility tidak hanya bersifat teknologis, tetapi juga bersifat sistemik, mencakup pengaturan lalu lintas udara ketinggian rendah, infrastruktur pendukung, serta aturan operasional di wilayah perkotaan. Hal ini menunjukkan bahwa UAM berkembang sebagai sistem terintegrasi yang memerlukan keterlibatan berbagai disiplin, termasuk perencanaan kota dan arsitektur.

Dengan demikian, latar belakang dan evolusi Urban Air Mobility menunjukkan pergeseran paradigma transportasi udara dari sistem yang terpusat dan berskala besar menuju sistem yang lebih terdistribusi, adaptif, dan terintegrasi dengan kota. Pemahaman terhadap evolusi ini menjadi dasar penting dalam merancang infrastruktur pendukung UAM, khususnya vertiport dan terminal eVTOL, sebagai bagian dari sistem mobilitas udara perkotaan masa depan.

2.1.2 Komponen Sistem Urban Air Mobility

Sistem Urban Air Mobility (UAM) merupakan sistem terintegrasi yang tersusun atas beberapa komponen utama yang saling berkaitan dan tidak dapat berdiri sendiri. Menurut NASA (2020), keberhasilan implementasi UAM sangat bergantung pada keterpaduan antara kendaraan udara, infrastruktur fisik, sistem pengaturan lalu lintas udara, serta regulasi dan operasional pendukung.

Komponen pertama dalam sistem UAM adalah kendaraan udara, yang umumnya berupa pesawat Electric Vertical Take-Off and Landing (eVTOL). Pesawat ini dirancang untuk beroperasi pada ketinggian rendah, memiliki kemampuan lepas landas dan mendarat secara vertikal, serta menggunakan tenaga listrik guna mengurangi emisi dan kebisingan (EASA, 2019). Karakteristik eVTOL ini secara langsung memengaruhi kebutuhan ruang, keselamatan, dan desain infrastruktur pendukung.

Komponen kedua adalah infrastruktur pendukung, yang meliputi vertiport, terminal eVTOL, fasilitas pengisian energi, serta pusat kontrol operasional. Vertiport berfungsi sebagai titik lepas landas, pendaratan, dan pelayanan penumpang, sementara terminal eVTOL mengakomodasi aktivitas publik dan operasional. Menurut FAA (2022), perancangan infrastruktur UAM harus mempertimbangkan keselamatan, efisiensi sirkulasi, dan keterpaduan dengan lingkungan perkotaan.

Komponen ketiga adalah sistem pengaturan lalu lintas udara ketinggian rendah, yang bertugas mengatur pergerakan eVTOL agar aman dan terkoordinasi. Sistem ini menjadi penghubung antara kendaraan udara dan infrastruktur fisik, serta berperan penting dalam menjamin keselamatan operasional UAM (NASA, 2021).

Selain komponen teknis, UAM juga didukung oleh kerangka regulasi dan operasional, yang mencakup aturan penerbangan, standar keselamatan, serta kebijakan penggunaan ruang udara perkotaan. Qu et al. (2023) menegaskan bahwa integrasi antara teknologi, infrastruktur, dan regulasi merupakan prasyarat utama agar sistem Urban Air Mobility dapat dioperasikan secara efektif di kawasan perkotaan.

Dengan demikian, sistem Urban Air Mobility dapat dipahami sebagai ekosistem yang kompleks dan saling terhubung. Pemahaman terhadap setiap komponen sistem ini menjadi dasar penting dalam perancangan vertiport dan terminal eVTOL sebagai bagian dari infrastruktur UAM.

2.1.3 Pengaturan Lalu Lintas Udara Ketinggian Rendah dalam Urban Air Mobility

Operasional Urban Air Mobility berlangsung pada ketinggian rendah di atas kawasan perkotaan, sehingga memerlukan sistem pengaturan lalu lintas udara yang berbeda dari penerbangan konvensional. Sistem ini dikenal sebagai low-altitude air traffic management, yang dirancang untuk mengatur pergerakan pesawat eVTOL secara aman, efisien, dan terkoordinasi dalam ruang udara yang padat (NASA, 2021).

Berbeda dengan sistem Air Traffic Management (ATM) konvensional yang berfokus pada penerbangan komersial berskala besar, pengaturan lalu lintas udara UAM menekankan penggunaan teknologi digital, komunikasi real-time, serta otomatisasi sistem. NASA (2021) menjelaskan bahwa sistem ini bertujuan untuk mengatur rute penerbangan, jadwal operasi, serta jarak aman antar pesawat pada ketinggian rendah di lingkungan perkotaan.

Qu et al. (2023) menyatakan bahwa aturan lalu lintas udara UAM harus dirancang secara

husus untuk mengakomodasi karakteristik penerbangan eVTOL, seperti frekuensi penerbangan yang tinggi dan jarak tempuh yang relatif pendek. Oleh karena itu, sistem pengaturan lalu lintas udara UAM perlu terintegrasi dengan infrastruktur vertiport dan pusat kontrol operasional agar pergerakan pesawat dapat dipantau dan dikendalikan secara menyeluruh.

Dalam konteks perancangan arsitektur, keberadaan sistem pengaturan lalu lintas udara ketinggian rendah memiliki implikasi terhadap kebutuhan ruang dan fasilitas bangunan. Vertiport dan terminal eVTOL perlu dilengkapi dengan fasilitas pendukung seperti ruang kontrol, sistem komunikasi, serta infrastruktur teknologi yang terintegrasi dengan sistem manajemen lalu lintas udara. Hal ini menunjukkan bahwa pengaturan lalu lintas udara tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga berpengaruh terhadap desain dan tata ruang bangunan.

Dengan demikian, pengaturan lalu lintas udara ketinggian rendah merupakan elemen kunci dalam sistem Urban Air Mobility. Integrasi antara sistem ini dengan perancangan vertiport dan terminal eVTOL menjadi faktor penting dalam mewujudkan sistem mobilitas udara perkotaan yang aman, efisien, dan berkelanjutan.

2.1.3 Urban Air Mobility dalam Konteks Arsitektur

Urban Air Mobility (UAM) tidak hanya menghadirkan inovasi dalam sistem transportasi udara, tetapi juga menimbulkan implikasi langsung terhadap bidang arsitektur dan perancangan kota. Kehadiran UAM menuntut terbentuknya tipologi bangunan baru yang mampu mengakomodasi fungsi transportasi udara, aktivitas publik, serta sistem teknologi secara terpadu dalam lingkungan perkotaan.

Dalam konteks arsitektur, infrastruktur UAM seperti vertiport dan terminal eVTOL berperan sebagai node spasial yang menghubungkan sistem transportasi udara dengan jaringan kota. Menurut Kasarda dan Lindsay (2011), infrastruktur transportasi modern memiliki peran strategis sebagai penggerak aktivitas ekonomi dan pembentuk struktur ruang kota. Prinsip ini relevan diterapkan pada UAM, di mana vertiport tidak hanya berfungsi sebagai fasilitas operasional, tetapi juga sebagai bagian dari sistem perkotaan yang aktif.

Perancangan arsitektur UAM juga dipengaruhi oleh karakteristik teknis eVTOL, seperti kebutuhan ruang lepas landas vertikal, sistem keselamatan, serta integrasi teknologi digital. FAA (2022) menyatakan bahwa vertiport harus dirancang dengan mempertimbangkan aspek keselamatan penerbangan, sirkulasi penumpang, dan pemisahan area publik serta area operasional. Hal ini mendorong arsitektur untuk merespons kebutuhan teknis tersebut melalui

pengaturan massa bangunan, zonasi, dan sistem struktur yang spesifik.

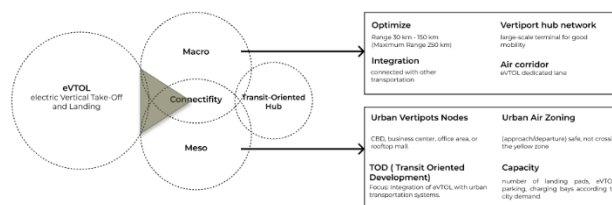
Selain aspek fungsional, Urban Air Mobility mendorong arsitektur untuk beradaptasi dengan isu keberlanjutan. Penggunaan pesawat listrik membuka peluang penerapan konsep bangunan rendah emisi, pemanfaatan energi terbarukan, serta desain yang responsif terhadap lingkungan perkotaan. EASA (2019) menekankan bahwa integrasi UAM di kota harus memperhatikan dampak kebisingan, visual, dan lingkungan, yang secara langsung memengaruhi pendekatan desain arsitektur.

Dari perspektif teori arsitektur kontemporer, UAM dapat dipahami sebagai bagian dari transformasi arsitektur menuju sistem yang lebih adaptif dan futuristik. Arsitektur tidak lagi sekadar membentuk ruang statis, tetapi berperan sebagai platform operasional yang mendukung mobilitas, teknologi, dan interaksi manusia. Dengan demikian, bangunan vertiport dan terminal eVTOL dapat diposisikan sebagai prototipe arsitektur masa depan yang merepresentasikan hubungan antara manusia, teknologi, dan kota.

Berdasarkan uraian tersebut, Urban Air Mobility dalam konteks arsitektur menuntut pendekatan perancangan yang holistik, menggabungkan aspek teknis penerbangan, kebutuhan ruang perkotaan, serta kualitas arsitektural. Pemahaman ini menjadi landasan penting dalam merancang vertiport sebagai infrastruktur transportasi udara sekaligus elemen pembentuk ruang kota masa depan.

2.2 Electric Vertical Take-Off and Landing (eVTOL)

eVTOL merupakan moda transportasi udara baru berbasis listrik yang dirancang untuk lepas landas dan mendarat secara vertikal. Teknologi ini dikembangkan dalam kerangka urban air mobility (UAM), yaitu sistem transportasi udara jarak pendek yang beroperasi di wilayah perkotaan dan peri-urban (NASA, 2021).

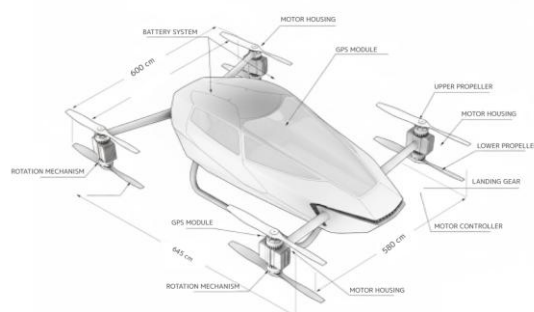


Gambar 1. Diagram Analisis eVTOL

(sumber:penulis)

FAA (2022) telah mengeluarkan pedoman teknis untuk desain vertiport, yang mencakup kebutuhan landasan pendaratan, area keselamatan, fasilitas pengisian daya listrik, dan integrasi dengan moda transportasi lain. Sementara itu, EASA (2022) menyoroti pentingnya aspek non-teknis seperti penerimaan masyarakat, mitigasi kebisingan, dan dampak sosial dalam pengembangan UAM di Eropa.

Studi Skyports (2021) di Singapura serta roadmap K-UAM Korea Selatan (MOLIT, 2020) menunjukkan bahwa implementasi vertiport menekankan integrasi dengan sistem transportasi publik, ketersediaan energi terbarukan, serta dukungan kebijakan pemerintah.



Gambar 2. eVTOL (sumber:airportIR by Modalis)

2.2.1 Pengertian dan Karakteristik eVTOL

Electric Vertical Take-Off and Landing (eVTOL) merupakan pesawat udara generasi baru yang dirancang untuk mendukung mobilitas udara perkotaan melalui kemampuan lepas landas dan mendarat secara vertikal dengan sumber tenaga listrik. Menurut European Union Aviation Safety Agency (EASA, 2019), eVTOL diklasifikasikan sebagai pesawat udara berawak atau tanpa awak yang menggunakan sistem propulsi listrik dan dioperasikan pada ketinggian rendah untuk perjalanan jarak pendek hingga menengah di wilayah perkotaan.

Secara teknis, eVTOL dikembangkan sebagai respons terhadap keterbatasan pesawat konvensional dalam konteks kota, terutama kebutuhan landasan pacu panjang, tingkat kebisingan

tinggi, serta emisi karbon yang signifikan. NASA (2020) menyebutkan bahwa eVTOL dirancang untuk mengisi celah transportasi antara mobilitas darat dan penerbangan komersial, dengan fokus pada efisiensi waktu tempuh, fleksibilitas rute, dan integrasi dengan infrastruktur kota.

Salah satu karakteristik utama eVTOL adalah kemampuan vertical take-off and landing, yang memungkinkan pesawat beroperasi pada area terbatas tanpa memerlukan runway. Kemampuan ini secara langsung memengaruhi kebutuhan infrastruktur, di mana area touchdown and liftoff (TLOF) dapat dirancang dengan dimensi yang relatif kecil dibandingkan bandara konvensional. FAA (2022) menyatakan bahwa TLOF untuk eVTOL umumnya berkisar antara 20–30 meter, tergantung pada tipe dan konfigurasi pesawat, sehingga memungkinkan integrasi vertiport ke dalam struktur bangunan perkotaan.

Karakteristik berikutnya adalah penggunaan sistem propulsi listrik terdistribusi (distributed electric propulsion). Sistem ini menggunakan beberapa motor listrik dan rotor yang bekerja secara simultan untuk menghasilkan daya angkat dan stabilitas penerbangan. Menurut NASA (2021), sistem propulsi terdistribusi memberikan keunggulan berupa efisiensi energi yang lebih tinggi, tingkat kebisingan yang lebih rendah, serta redundansi sistem yang meningkatkan aspek keselamatan. Dari sudut pandang perancangan, karakteristik ini berimplikasi pada pengendalian kebisingan, getaran struktur, serta penempatan zona operasional pada vertiport.

Dari segi performa, eVTOL dirancang untuk melayani jarak tempuh pendek hingga menengah dengan kecepatan jelajah berkisar antara 100–300 km/jam dan jangkauan operasional rata-rata 20–100 km, tergantung teknologi baterai dan kapasitas muatan (EASA, 2019). Data ini menunjukkan bahwa eVTOL tidak ditujukan untuk menggantikan penerbangan komersial jarak jauh, melainkan sebagai moda transportasi intra-kota dan antar-kawasan metropolitan.

Kapasitas penumpang eVTOL umumnya berkisar antara 2 hingga 6 orang, termasuk pilot, dengan bobot dan dimensi yang relatif kompak. Karakteristik ini berdampak pada skala ruang terminal eVTOL, di mana desain tidak memerlukan fasilitas berskala besar seperti bandara konvensional, namun tetap harus memperhatikan aspek keselamatan, kenyamanan, dan sirkulasi penumpang.

Selain itu, karakteristik penting eVTOL adalah tingkat kebisingan yang lebih rendah dibandingkan helikopter konvensional. EASA (2022) menyebutkan bahwa eVTOL dirancang untuk menghasilkan kebisingan di bawah ambang batas yang dapat diterima di kawasan perkotaan, sehingga lebih kompatibel dengan lingkungan hunian dan pusat aktivitas kota. Hal ini

menjadi faktor penting dalam penentuan lokasi vertiport dan pendekatan desain arsitektur yang sensitif terhadap lingkungan sekitar.

Berdasarkan uraian tersebut, eVTOL dapat dipahami sebagai moda transportasi udara yang memiliki karakteristik teknis, operasional, dan spasial yang berbeda dari pesawat konvensional. Pemahaman terhadap pengertian dan karakteristik eVTOL menjadi dasar penting dalam perancangan vertiport dan terminal eVTOL, karena setiap karakteristik pesawat berimplikasi langsung terhadap kebutuhan ruang, struktur, sistem utilitas, serta integrasi dengan konteks perkotaan.

2.2.2 Sistem Propulsi dan Energi eVTOL

Sistem propulsi merupakan elemen utama yang membedakan eVTOL dari pesawat konvensional. Berbeda dengan pesawat berbahan bakar fosil yang menggunakan mesin turbin atau piston, eVTOL umumnya menggunakan motor listrik yang digerakkan oleh baterai atau sumber energi alternatif lainnya. Menurut NASA (2021), penggunaan sistem propulsi listrik memungkinkan konfigurasi distributed electric propulsion (DEP), yaitu distribusi beberapa motor dan rotor dalam satu pesawat untuk meningkatkan efisiensi, stabilitas, dan redundansi keselamatan.

Konsep distributed electric propulsion memberikan beberapa keunggulan teknis. Pertama, sistem ini memungkinkan kontrol daya yang lebih presisi pada setiap rotor, sehingga meningkatkan stabilitas saat hovering dan manuver vertikal. Kedua, sistem multi-rotor menciptakan redundansi, di mana kegagalan satu motor tidak langsung menyebabkan hilangnya daya angkat secara keseluruhan. Hal ini menjadi faktor penting dalam sertifikasi keselamatan (NASA, 2021).

Dari sisi energi, sebagian besar prototipe eVTOL saat ini menggunakan baterai lithium-ion berkapasitas tinggi. Namun, keterbatasan utama baterai adalah densitas energi yang masih lebih rendah dibandingkan bahan bakar avtur. EASA (2019) mencatat bahwa keterbatasan densitas energi baterai berdampak pada jangkauan terbang yang relatif pendek, rata-rata antara 20–100 km, tergantung kapasitas dan konfigurasi pesawat. Oleh karena itu, pengembangan teknologi baterai menjadi aspek krusial dalam meningkatkan performa eVTOL.

Selain baterai, beberapa pengembang mulai mengeksplorasi penggunaan energi hidrogen dan sistem hybrid-electric sebagai alternatif. Hidrogen memiliki potensi densitas energi yang lebih tinggi dan emisi karbon yang lebih rendah jika diproduksi dari sumber energi terbarukan.

Menurut studi EASA (2022), penggunaan sel bahan bakar hidrogen berpotensi memperpanjang jangkauan operasional sekaligus mengurangi waktu pengisian dibandingkan sistem baterai murni. Namun, implementasinya memerlukan infrastruktur penyimpanan dan distribusi hidrogen yang aman dan terstandarisasi.

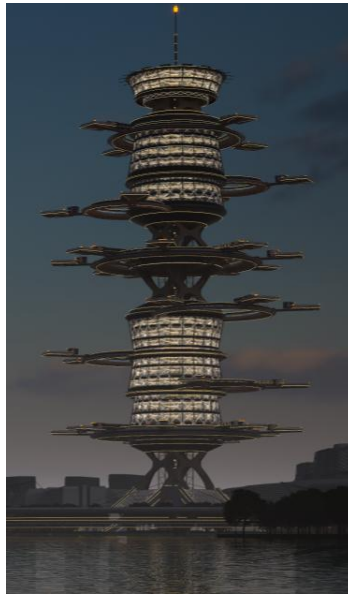
Implikasi sistem propulsi dan energi ini sangat signifikan terhadap perancangan vertiport. Pertama, vertiport harus menyediakan fasilitas pengisian daya (charging station) berkapasitas tinggi yang mampu mendukung waktu rotasi pesawat yang cepat. NASA (2020) menekankan bahwa salah satu tantangan operasional UAM adalah memastikan efisiensi waktu darat (turnaround time), sehingga sistem pengisian energi harus terintegrasi dengan area parkir dan TLOF.

Kedua, jika menggunakan hidrogen atau sistem hybrid, vertiport perlu dilengkapi dengan ruang penyimpanan energi khusus, sistem ventilasi, serta standar keselamatan kebakaran yang lebih ketat. Hal ini memengaruhi kebutuhan zonasi bangunan, pemisahan area teknis dan publik, serta perencanaan sistem utilitas.

Ketiga, penggunaan motor listrik berdampak pada tingkat kebisingan yang lebih rendah dibandingkan helikopter konvensional. EASA (2019) menyebutkan bahwa pengurangan kebisingan menjadi salah satu keunggulan utama eVTOL dalam konteks perkotaan. Dari perspektif arsitektur, hal ini memungkinkan integrasi vertiport ke dalam kawasan campuran (mixed-use) dengan gangguan lingkungan yang lebih minimal, meskipun tetap memerlukan studi akustik dan mitigasi getaran struktur.

Dengan demikian, sistem propulsi dan energi eVTOL bukan hanya persoalan teknologi penerbangan, tetapi juga menentukan kebutuhan ruang, utilitas, keselamatan, dan integrasi vertiport dalam konteks kota. Pemahaman terhadap sistem energi ini menjadi dasar penting dalam merancang infrastruktur yang adaptif terhadap perkembangan teknologi transportasi udara masa depan.

2.2.3 Dimensi dan Kebutuhan Spasial eVTOL



Gambar 3. vertical terminal eVTOL PA 5

(sumber:penulis,2025)

Dimensi dan karakteristik fisik eVTOL menjadi dasar utama dalam menentukan kebutuhan ruang vertiport. Berbeda dengan pesawat konvensional yang memerlukan landasan pacu panjang, eVTOL beroperasi secara vertikal sehingga kebutuhan ruang horizontal lebih kompak. Namun demikian, perencanaan tetap harus mempertimbangkan dimensi rotor, bentang sayap (jika menggunakan konfigurasi tilt-rotor atau lift+cruise), serta zona keselamatan di sekeliling pesawat.

Menurut FAA (2022) dalam Vertiport Design Advisory Circular, ukuran area Touchdown and Liftoff (TLOF) ditentukan berdasarkan dimensi keseluruhan pesawat (overall dimension). Untuk eVTOL berkapasitas 2–6 penumpang, diameter rotor atau bentang pesawat umumnya berada pada kisaran ± 10 –15 meter. Oleh karena itu, dimensi TLOF umumnya dirancang dengan ukuran minimal sekitar 1,0–1,5 kali dimensi terluas pesawat, sehingga menghasilkan area operasional berkisar ± 20 –30 meter, tergantung tipe pesawat dan faktor keselamatan.

Selain TLOF, vertiport juga harus memiliki Final Approach and Take-Off Area (FATO) yang berfungsi sebagai zona pendekatan dan keberangkatan. FATO dirancang lebih luas dari

TLOF untuk mengakomodasi manuver penerbangan dan buffer keselamatan. Standar FAA (2022) menyatakan bahwa FATO harus bebas dari hambatan vertikal dan dilengkapi dengan sistem pencahayaan serta marka yang jelas, terutama untuk operasi malam hari atau kondisi visibilitas rendah.

Dari sisi kapasitas, eVTOL dirancang untuk rotasi penerbangan yang relatif cepat, dengan waktu darat (turnaround time) yang ditargetkan hanya beberapa menit untuk proses penurunan penumpang, pengisian energi, dan persiapan penerbangan berikutnya (NASA, 2020). Hal ini berdampak pada kebutuhan area parkir (parking stand) dan staging area tambahan di luar TLOF, guna menghindari kemacetan operasional pada satu titik pendaratan.

- Kebutuhan spasial eVTOL juga mencakup area teknis seperti:
- fasilitas pengisian daya listrik atau pengisian hidrogen,
- ruang kontrol operasional,
- zona keamanan dan pemisahan area publik–operasional,
- sistem pemadam kebakaran khusus untuk baterai atau bahan bakar alternatif.

EASA (2019) menekankan bahwa integrasi eVTOL di kawasan perkotaan memerlukan perencanaan ruang yang memperhatikan jarak aman terhadap bangunan sekitar, jalur evakuasi darurat, serta mitigasi kebisingan. Oleh karena itu, vertiport tidak hanya membutuhkan area lepas landas, tetapi juga buffer ruang vertikal dan horizontal sebagai bagian dari sistem keselamatan.

Dalam konteks arsitektur, dimensi eVTOL memungkinkan pengembangan vertiport secara vertikal, seperti pada atap gedung tinggi atau bangunan mixed-use. Namun, integrasi tersebut memerlukan analisis beban struktur akibat gaya dinamis rotor, getaran, serta distribusi beban titik pada area TLOF. Dengan demikian, perancangan struktur dan sistem bangunan harus disesuaikan dengan karakteristik berat maksimum lepas landas (maximum take-off weight/MTOW) dari eVTOL yang digunakan.

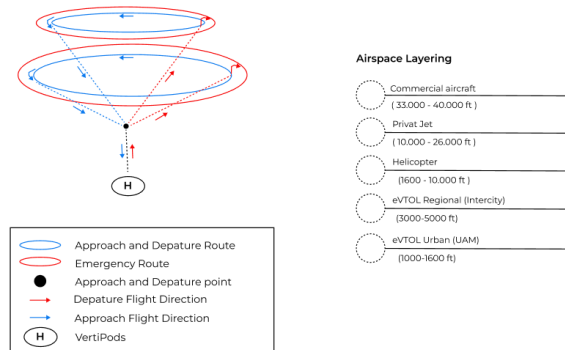
Berdasarkan uraian tersebut, dimensi dan kebutuhan spasial eVTOL menunjukkan bahwa meskipun skala fisiknya lebih kecil dibanding pesawat konvensional, kompleksitas perencanaannya tetap tinggi karena berkaitan dengan keselamatan, rotasi operasional cepat, serta integrasi dengan konteks perkotaan. Pemahaman terhadap aspek ini menjadi landasan penting dalam menentukan kapasitas, tata letak, dan konfigurasi vertiport sebagai infrastruktur

pendukung Urban Air Mobility.

2.3 Vertiport sebagai Infrastruktur eVTOL

Vertiport merupakan infrastruktur darat yang dirancang khusus untuk mendukung operasional pesawat Electric Vertical Take-Off and Landing (eVTOL). Berbeda dengan bandara konvensional yang membutuhkan landasan pacu panjang dan sistem terminal berskala besar, vertiport memiliki skala yang lebih kompak, fleksibel, dan terintegrasi dengan kawasan perkotaan. Keberadaan vertiport menjadi elemen kunci dalam sistem Urban Air Mobility (UAM), karena berfungsi sebagai titik awal dan akhir perjalanan udara jarak pendek.

Menurut FAA (2022), vertiport didefinisikan sebagai fasilitas yang menyediakan area pendaratan dan lepas landas vertikal, fasilitas parkir pesawat, serta infrastruktur pendukung seperti terminal penumpang, sistem pengisian energi, dan fasilitas keselamatan. Dalam konteks perencanaan kota, vertiport tidak hanya dipahami sebagai fasilitas teknis penerbangan, tetapi juga sebagai simpul mobilitas baru yang menghubungkan transportasi udara dengan jaringan darat.



Gambar 4 Diagram Teknik dan Operasional eVTOL

(sumber: penulis,2025)

2.3.1 Pengertian dan Fungsi Vertiport

Vertiport merupakan infrastruktur penerbangan yang dirancang secara khusus untuk mendukung operasional pesawat Electric Vertical Take-Off and Landing (eVTOL) dalam sistem Urban Air Mobility (UAM). Berbeda dengan bandara konvensional yang berorientasi pada

pesawat bersayap tetap dengan kebutuhan landasan pacu horizontal, vertiport dirancang untuk mengakomodasi operasi lepas landas dan pendaratan vertikal dalam ruang yang lebih kompak dan terintegrasi dengan kawasan perkotaan.

Menurut Federal Aviation Administration (FAA, 2022), vertiport adalah fasilitas yang mencakup area touchdown and liftoff (TLOF), final approach and take-off area (FATO), serta fasilitas pendukung lainnya yang memungkinkan operasi aman pesawat vertikal. Definisi ini menegaskan bahwa vertiport tidak hanya berupa titik pendaratan, tetapi merupakan sistem fasilitas yang terintegrasi secara operasional dan teknis.

Dalam konteks Urban Air Mobility, vertiport berfungsi sebagai simpul mobilitas udara (air mobility node) yang menghubungkan perjalanan udara jarak pendek dengan sistem transportasi darat. NASA (2020) menjelaskan bahwa vertiport merupakan bagian dari jaringan distribusi mobilitas udara yang dirancang untuk mendukung perjalanan point-to-point secara efisien di kawasan metropolitan. Artinya, vertiport berperan sebagai titik transisi antar moda, bukan sekadar fasilitas teknis penerbangan.

Secara fungsional, vertiport memiliki beberapa peran utama:

- Fungsi Operasional Penerbangan

Vertiport menjadi lokasi utama untuk proses pendaratan, lepas landas, dan parkir eVTOL. Fungsi ini menuntut adanya standar keselamatan tinggi, bebas hambatan vertikal, serta sistem pengaturan lalu lintas udara yang terintegrasi. Selain itu, vertiport juga harus mendukung proses rotasi cepat pesawat guna menjaga efisiensi operasional.

- Fungsi Transit Penumpang

Sebagai fasilitas publik, vertiport berfungsi sebagai ruang transisi bagi penumpang yang berpindah dari transportasi darat ke udara atau sebaliknya. Oleh karena itu, vertiport memerlukan ruang tunggu, sistem pemeriksaan keamanan, sirkulasi yang jelas, serta konektivitas dengan moda transportasi lain. Dalam konteks ini, vertiport memiliki karakteristik yang menyerupai terminal bandara dalam skala yang lebih kecil.

- Fungsi Teknologis dan Energi

Vertiport menjadi pusat pengisian energi eVTOL, baik berupa charging station listrik maupun fasilitas penyimpanan hidrogen jika menggunakan sistem energi alternatif.

Keberadaan fungsi ini menjadikan vertiport sebagai infrastruktur teknologi yang kompleks, yang memerlukan pengaturan utilitas, proteksi kebakaran, dan sistem keamanan tambahan.

- **Fungsi Perkotaan dan Ekonomi**

Dalam perspektif perencanaan kota, vertiport berpotensi menjadi katalis aktivitas ekonomi dan pembentuk struktur ruang baru. Seperti yang dijelaskan Kasarda dan Lindsay (2011) dalam konsep aerotropolis, infrastruktur transportasi udara dapat memengaruhi pola pertumbuhan kawasan. Meskipun dalam skala lebih kecil, vertiport berpotensi memicu perkembangan kawasan campuran (mixed-use) di sekitarnya, terutama jika terintegrasi dengan pusat bisnis, rumah sakit, atau kawasan komersial.

Selain fungsi-fungsi tersebut, vertiport juga memiliki dimensi sosial dan lingkungan. EASA (2019) menekankan bahwa implementasi vertiport di kawasan perkotaan harus mempertimbangkan dampak kebisingan, visual, dan keselamatan publik. Oleh karena itu, vertiport tidak dapat dirancang hanya berdasarkan kebutuhan teknis, tetapi juga harus mempertimbangkan aspek kenyamanan dan penerimaan masyarakat.

Dari sudut pandang arsitektur, vertiport dapat dipahami sebagai tipologi bangunan baru yang memadukan fungsi transportasi, teknologi, dan ruang publik dalam satu sistem terpadu. Keberadaannya menuntut pendekatan desain yang mampu mengintegrasikan kebutuhan operasional penerbangan dengan kualitas ruang yang aman, nyaman, dan adaptif terhadap konteks kota.

Dengan demikian, vertiport bukan sekadar “landasan vertikal”, melainkan infrastruktur mobilitas udara yang memiliki fungsi operasional, teknologis, sosial, dan perkotaan secara simultan. Pemahaman yang komprehensif terhadap fungsi ini menjadi dasar dalam merancang vertiport sebagai bagian integral dari sistem Urban Air Mobility.

2.3.2 Komponen Teknis Vertiport

1. Touchdown and Liftoff Area (TLOF) – Area Pendaratan dan Lepas Landas

TLOF merupakan area inti tempat eVTOL melakukan pendaratan dan lepas landas secara vertikal. Menurut FAA (2022), dimensi TLOF ditentukan berdasarkan dimensi terluas pesawat (overall dimension), dengan ukuran minimal sekitar 1,0–1,5 kali bentang rotor atau badan

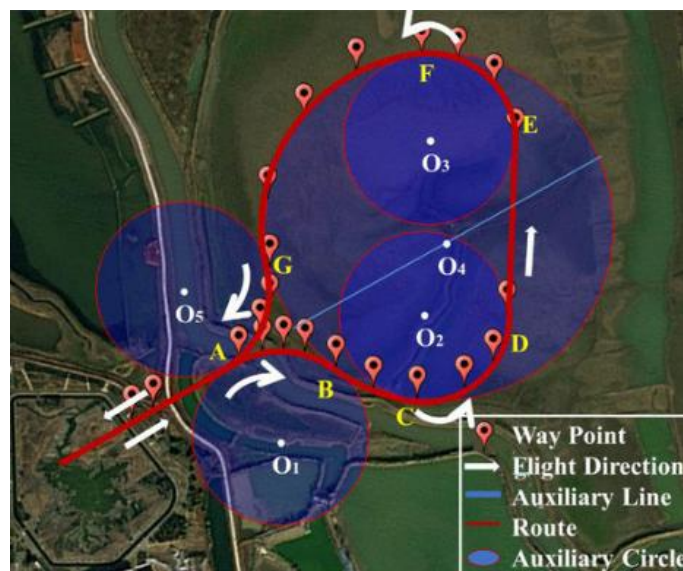
pesawat. Untuk eVTOL kapasitas 2–6 penumpang.

Permukaan TLOF harus memiliki daya dukung struktur yang mampu menahan Maximum Take-Off Weight (MTOW) serta gaya dinamis rotor. Pada vertiport tipe rooftop, perencanaan struktur menjadi aspek krusial karena harus memperhitungkan beban titik, getaran, serta distribusi beban ke sistem struktur bangunan utama.

2. Final Approach and Takeoff Area (FATO) – Ruang Udara Aman untuk Manuver

FATO adalah area yang mengelilingi TLOF dan berfungsi sebagai zona keselamatan untuk manuver pendekatan dan keberangkatan. Area ini harus bebas dari hambatan vertikal seperti antena, tiang, atau massa bangunan lain.

FAA (2022) menegaskan bahwa FATO harus memastikan jalur pendekatan yang aman sesuai profil penerbangan eVTOL. Dalam konteks perkotaan, hal ini berdampak pada pengaturan ketinggian bangunan sekitar serta pembentukan koridor udara bebas hambatan. Secara arsitektural, keberadaan FATO memengaruhi tata massa bangunan dan perencanaan setback kawasan.



Gambar 5 Traffic Rules (sumber: mdpi.com)

3. Apron & Taxiway – Jalur Parkir dan Pergerakan

Apron merupakan area parkir eVTOL untuk proses naik-turun penumpang dan pengisian

energi. Taxiway pada vertiport berfungsi sebagai jalur pergerakan pesawat dari TLOF menuju area parkir.

NASA (2020) menyatakan bahwa sistem UAM dirancang untuk rotasi cepat, sehingga dibutuhkan apron tambahan agar TLOF tidak mengalami bottleneck operasional. Area ini harus memiliki pembatas fisik yang jelas untuk memisahkan pergerakan pesawat dari area publik.

Dalam perancangan arsitektur, apron harus terhubung langsung dengan terminal melalui jalur aman yang terkontrol, baik melalui koridor tertutup maupun sistem boarding bridge khusus eVTOL.

4. Passenger Processing Area – Terminal Penumpang

Passenger Processing Area merupakan fasilitas publik yang meliputi:

- area check-in (umumnya berbasis digital/self check-in),
- ruang tunggu (lounge),
- pemeriksaan keamanan,
- ruang keberangkatan dan kedatangan,
- sirkulasi vertikal (lift, tangga, eskalator).

Meskipun kapasitas eVTOL relatif kecil, terminal tetap harus dirancang berdasarkan prinsip keselamatan, kenyamanan, dan efisiensi alur penumpang. FAA (2022) menekankan pentingnya pemisahan zonasi publik dan operasional.

Dalam konteks desain, terminal vertiport dapat diintegrasikan dengan bangunan mixed-use atau transport hub, sehingga memperkuat konsep mobilitas multimoda di kawasan perkotaan.

5. Charging Hub – Fasilitas Pengisian Daya Listrik Berbasis Energi Terbarukan

Charging Hub merupakan elemen penting dalam operasional eVTOL berbasis listrik. Fasilitas ini mencakup sistem pengisian daya berkapasitas tinggi untuk mendukung turnaround time yang cepat.

NASA (2020) menyebutkan bahwa efisiensi pengisian energi menjadi faktor utama dalam keberhasilan sistem UAM. Oleh karena itu, vertiport perlu dilengkapi sistem distribusi daya yang stabil, ruang teknis khusus, serta sistem manajemen energi.

Dalam pendekatan berkelanjutan, charging hub dapat diintegrasikan dengan sumber energi terbarukan seperti panel surya atau sistem penyimpanan energi (battery storage system).

Jika menggunakan hidrogen, diperlukan fasilitas penyimpanan dengan standar keamanan tambahan (EASA, 2022).

6. Control & Safety Facilities – Pusat Kontrol dan Keselamatan

Fasilitas ini mencakup:

- ruang kontrol operasional,
- sistem komunikasi dan navigasi,
- integrasi dengan low-altitude Air Traffic Management (ATM),
- fasilitas pemadam kebakaran khusus baterai atau bahan bakar alternatif,
- sistem keamanan dan pengawasan (CCTV, access control).

Menurut NASA (2021), integrasi vertiport dengan sistem manajemen lalu lintas udara ketinggian rendah sangat penting untuk menghindari konflik penerbangan di wilayah padat. Oleh karena itu, dibutuhkan ruang kontrol yang terintegrasi secara digital dengan jaringan UAM kota.

Dari sisi desain, fasilitas ini harus ditempatkan pada zona terbatas (restricted area) dengan akses terkontrol.

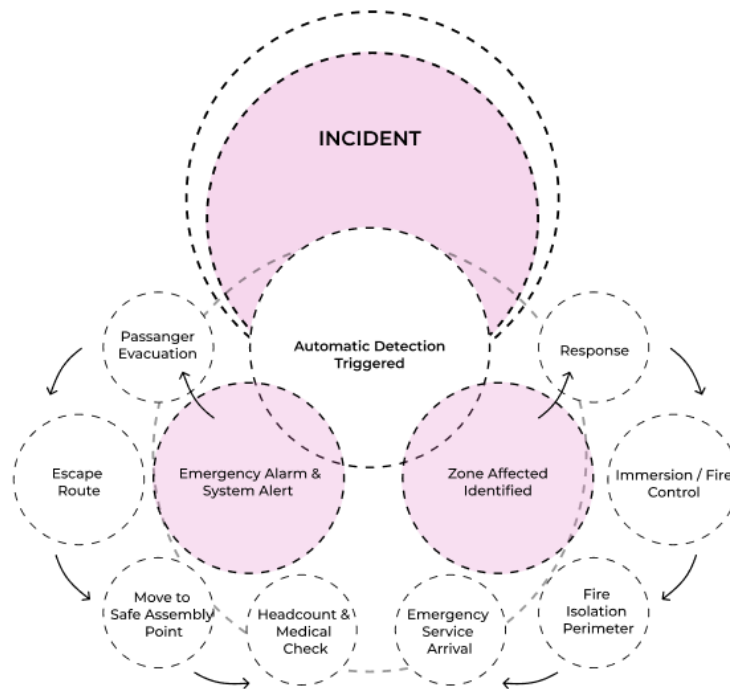
7. Supporting Facilities – Fasilitas Pendukung

Supporting facilities mencakup:

- area servis dan pemeliharaan ringan (light maintenance),
- ruang penyimpanan suku cadang,
- fasilitas logistik ringan,
- ruang staf dan administrasi.

Meskipun berskala lebih kecil dibanding hanggar bandara, fasilitas ini tetap diperlukan untuk menjaga keberlanjutan operasional. Zonasi harus memisahkan area teknis dari area publik untuk menjaga keamanan dan efisiensi kerja.

2.3.2 Standar Keselamatan dan Regulasi Vertiport



Gambar 6 Diagram Incident (sumber:penulis)

Keselamatan merupakan prinsip utama dalam perencanaan dan pengoperasian vertiport sebagai infrastruktur pendukung eVTOL. Karena operasinya berlangsung di kawasan perkotaan yang padat aktivitas, vertiport harus memenuhi standar keselamatan penerbangan sekaligus mempertimbangkan keselamatan publik di sekitarnya. Oleh karena itu, perencanaan vertiport tidak hanya mengacu pada aspek desain fisik, tetapi juga pada regulasi penerbangan, manajemen risiko, serta integrasi sistem lalu lintas udara.

Menurut FAA (2022) dalam *Vertiport Design Advisory Circular*, standar keselamatan vertiport mencakup beberapa aspek utama, yaitu:

1. Keselamatan Area Operasional (Airside Safety)

Area TLOF dan FATO harus bebas dari hambatan (obstacle-free zone) dan dirancang sesuai dimensi pesawat yang beroperasi. Jalur pendekatan dan keberangkatan harus memiliki koridor udara aman dengan kemiringan dan clearance yang memenuhi standar profil penerbangan eVTOL. Selain itu, permukaan TLOF harus memiliki daya tahan terhadap beban maksimum lepas landas serta tidak licin dalam kondisi basah untuk

mencegah risiko kecelakaan.

2. Keselamatan Kebakaran dan Keadaan Darurat

Karena eVTOL menggunakan baterai lithium atau sistem energi alternatif seperti hidrogen, vertiport harus dilengkapi sistem proteksi kebakaran khusus. EASA (2019) menekankan pentingnya sistem pemadam kebakaran yang mampu menangani kebakaran baterai bertegangan tinggi, termasuk sistem deteksi dini dan jalur evakuasi yang jelas. Fasilitas darurat seperti ruang pemadam kebakaran, hydrant, serta akses kendaraan darurat harus menjadi bagian dari tata letak vertiport.

3. Keamanan (Security) dan Kontrol Akses

Area operasional harus dipisahkan secara fisik dan visual dari area publik. Sistem kontrol akses, CCTV, dan pemeriksaan keamanan penumpang diperlukan untuk mencegah gangguan operasional.

FAA (2022) menyebutkan bahwa meskipun skala vertiport lebih kecil dari bandara, prinsip keamanan penerbangan tetap harus diterapkan, termasuk pemisahan zona steril dan non-steril.

4. Integrasi dengan Low-Altitude Air Traffic Management (ATM)

Operasional vertiport harus terhubung dengan sistem manajemen lalu lintas udara ketinggian rendah. NASA (2021) menjelaskan bahwa sistem ini mengatur rute, ketinggian, serta jarak aman antar eVTOL di wilayah perkotaan. Oleh karena itu, vertiport memerlukan fasilitas komunikasi dan pusat kontrol operasional yang terintegrasi secara digital dengan jaringan UAM kota.

5. Standar Lingkungan dan Kebisingan

EASA (2019) dan ICAO (2019) menekankan bahwa infrastruktur penerbangan di kawasan urban harus memperhatikan dampak kebisingan, emisi, dan keselamatan publik. Meskipun eVTOL lebih senyap dibanding helikopter, studi kebisingan tetap diperlukan untuk menentukan lokasi dan orientasi TLOF. Hal ini berimplikasi pada pendekatan desain arsitektur yang mempertimbangkan barrier akustik, orientasi massa bangunan, dan jarak aman terhadap kawasan sensitif seperti hunian atau fasilitas pendidikan.

Implikasi Regulasi terhadap Perancangan Arsitektur:

Standar keselamatan dan regulasi vertiport memiliki dampak langsung terhadap proses perancangan, antara lain:

- Penentuan zonasi ketat antara area publik dan area operasional.
- Penyediaan jalur evakuasi darurat yang jelas dan terpisah.
- Perancangan struktur tahan beban dinamis dan risiko kebakaran.
- Penyediaan ruang kontrol dan fasilitas teknis yang terintegrasi.
- Analisis tata massa bangunan untuk memastikan koridor udara bebas hambatan.

Dengan demikian, regulasi dan standar keselamatan tidak hanya menjadi persyaratan administratif, tetapi menjadi parameter utama dalam pembentukan bentuk, tata ruang, dan sistem bangunan vertiport.

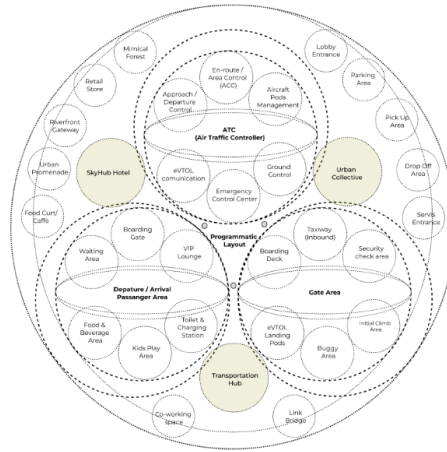
2.4 Prinsip Perancangan Vertikal Terminal eVTOL Berkelanjutan

Terminal eVTOL vertikal merupakan pengembangan dari konsep vertiport yang dirancang secara bertingkat untuk mengakomodasi keterbatasan lahan di kawasan perkotaan. Pendekatan vertikal memungkinkan berbagai fungsi operasional dan pelayanan penumpang ditempatkan dalam satu bangunan terintegrasi, sehingga efisiensi ruang dan fungsi dapat tercapai.

Secara fungsional, terminal eVTOL vertikal mengakomodasi kegiatan utama berupa proses kedatangan dan keberangkatan penumpang, operasional pesawat eVTOL, serta fasilitas pendukung seperti area tunggu, sistem keamanan, dan ruang pengelola. Penyusunan fungsi secara vertikal membutuhkan pengaturan zoning yang jelas agar aktivitas penumpang dan operasional penerbangan dapat berjalan tanpa saling mengganggu.

Dalam perancangan terminal eVTOL vertikal, sistem sirkulasi vertikal menjadi elemen penting. Sirkulasi harus dirancang aman, mudah dipahami, dan efisien, baik bagi penumpang, kru, maupun operasional pesawat. Selain itu, struktur bangunan harus mampu menahan beban dinamis akibat aktivitas lepas landas dan pendaratan eVTOL, sehingga aspek struktur dan keselamatan menjadi perhatian utama.

Sebagai bagian dari infrastruktur perkotaan, terminal eVTOL vertikal juga berperan sebagai simpul konektivitas yang menghubungkan transportasi udara dengan moda transportasi lain. Oleh karena itu, perancangan terminal tidak hanya mempertimbangkan fungsi internal bangunan, tetapi juga hubungan dengan konteks kota, aksesibilitas, dan kualitas ruang publik di sekitarnya.



Gambar 7. Diagram Kebutuhan Ruang

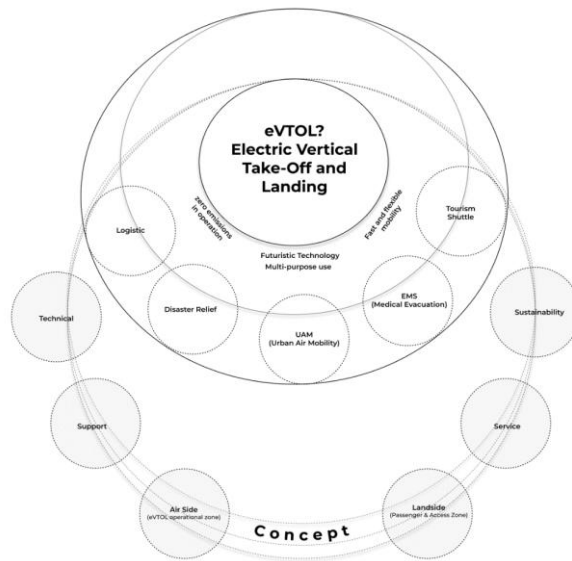
(sumber: penulis,2025)

2.5 Perencanaan Bandara

2.5.1 Bandara Konvensional

Perencanaan bandara konvensional merupakan dasar dalam memahami pengembangan infrastruktur transportasi udara baru seperti vertiport. Menurut Horonjeff et al. (2010), penentuan lokasi bandara harus mempertimbangkan aspek teknis, operasional, dan lingkungan, meliputi kondisi topografi, arah angin, hambatan penerbangan, serta aksesibilitas darat. ICAO (2019) menekankan pentingnya keselamatan, efisiensi, dan keberlanjutan lingkungan dalam setiap tahapan perencanaan bandara.

Selain aspek lokasi, perencanaan bandara juga mencakup pengaturan tata ruang dan zonasi yang jelas antara area operasional, area publik, dan area servis. Pemisahan zona ini bertujuan untuk menjamin keselamatan penerbangan, kelancaran sirkulasi, serta kenyamanan pengguna. Sistem sirkulasi penumpang dan kendaraan darat dirancang agar tidak mengganggu aktivitas operasional pesawat.



Gambar 8. Diagram Konsep Dasar Perancangan

(sumber: penulis,2025)