

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum Infrastruktur Kemanusiaan

Bagian ini membangun *grounding* tipologis sebelum dilakukan transformasi spekulatif. Infrastruktur kemanusiaan dipahami sebagai sistem spasial dan operasional yang dirancang untuk merespons kondisi darurat akibat bencana alam, krisis iklim, maupun konflik bersenjata. Dalam konteks global, sistem ini berperan sebagai penopang keberlangsungan hidup manusia melalui penyediaan kebutuhan dasar seperti hunian sementara, pangan, air bersih, layanan kesehatan, serta distribusi logistik. Namun, sebelum dilakukan reformulasi arsitektural menuju model hibrida darat–udara, diperlukan pemahaman kritis terhadap karakter dan keterbatasan tipologi eksisting.

2.1.1 Definisi Infrastruktur Kemanusiaan

Secara institusional, United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs mendefinisikan sistem kemanusiaan sebagai mekanisme terkoordinasi untuk memastikan distribusi bantuan darurat secara cepat dan efektif kepada populasi terdampak krisis (OCHA, 2012). Dalam konteks ini, infrastruktur dipahami sebagai dukungan fisik dan logistik yang memungkinkan operasional distribusi bantuan.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction menekankan bahwa infrastruktur kebencanaan merupakan sistem kritis yang menopang fungsi sosial melalui fasilitas evakuasi, logistik, dan layanan dasar yang harus tetap beroperasi dalam kondisi ekstrem (UNDRR, 2015). Sementara itu, Food and Agriculture Organization memandangnya sebagai jaringan penyimpanan dan distribusi pangan darurat untuk mencegah krisis kelaparan pada populasi terdampak (FAO, 2017).

Secara umum, infrastruktur kemanusiaan memiliki karakter: responsif terhadap situasi darurat (IFRC, 2018), berbasis distribusi bantuan (Balcik et al., 2010), bersifat sementara (Corsellis & Vitale, 2005), dan bergantung pada akses serta stabilitas daratan. Komponen utamanya meliputi shelter darurat, sistem logistik dan gudang, distribusi pangan dan air, fasilitas medis, serta sistem koordinasi lapangan.

Namun, berbagai kajian menunjukkan keterbatasan mendasar. Sistem logistik kemanusiaan sangat bergantung pada jaringan transportasi darat yang rentan terganggu oleh bencana atau konflik (Balcik & Beamon, 2008). Selain itu, respons bencana umumnya bersifat reaktif dan berorientasi pemulihan, bukan transformasi sistemik jangka panjang (Alexander, 2013). Dari perspektif arsitektural, tipologi hunian darurat juga cenderung berfungsi sebagai ruang perlindungan pasif tanpa kapasitas produksi sumber daya mandiri (Davis, 2015).

Dengan demikian, infrastruktur kemanusiaan saat ini cenderung bersifat reaktif, bergantung pada stabilitas daratan, dan beroperasi dalam paradigma distribusi, bukan metabolisme tertutup. Keterbatasan ini membuka ruang bagi pendekatan baru yang memposisikan arsitektur sebagai sistem kehidupan adaptif yang mampu memproduksi sekaligus mendistribusikan sumber daya dalam konfigurasi hibrida darat–udara.



Gambar 2. 1 Arsitektur sebagai Sistem Hidup

(Sumber: Visual oleh Penulis, 2026)

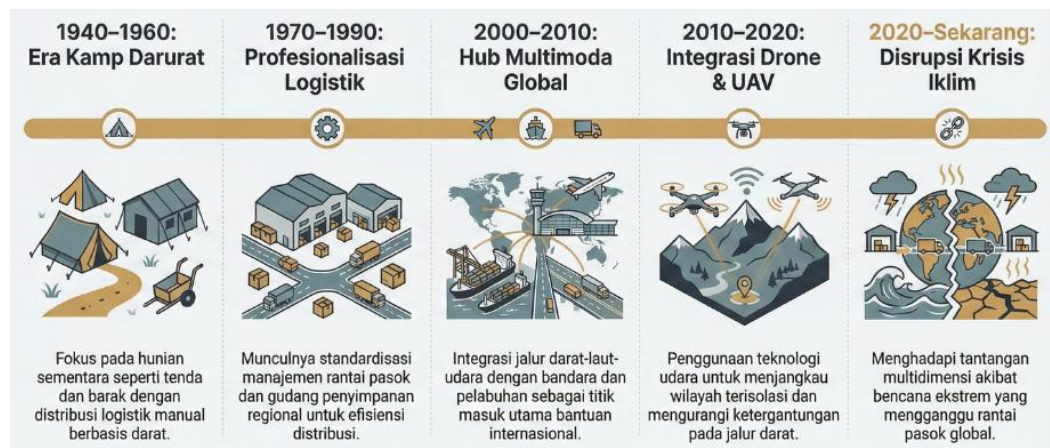
2.1.2 Evoluasi Tipologi Infrastruktur Kemanusiaan

Evolusi infrastruktur kemanusiaan menunjukkan pergeseran yang dipengaruhi konflik, teknologi, dan dinamika global. Infrastruktur ini tidak bersifat tetap, melainkan berkembang dari model hunian darurat menuju sistem logistik global yang lebih kompleks.

Pada periode pasca Perang Dunia II hingga 1960an, respons utama berupa kamp darurat yang menampung populasi terdampak dalam konfigurasi terestrial, modular, dan temporer untuk memudahkan distribusi bantuan (Corsellis & Vitale, 2005). Memasuki 1970–1990an, pendekatan *supply chain* mulai diterapkan melalui gudang logistik regional dan jaringan distribusi terkoordinasi untuk meningkatkan efisiensi bantuan (Van Wassenhove, 2006).

Pada awal abad ke21, integrasi multimoda berkembang melalui *humanitarian hub* berbasis pelabuhan dan bandara sebagai titik masuk bantuan global, sehingga udara mulai berperan dalam respons cepat (Jahre & Heigh, 2008). Dekade 2010–2020 kemudian memperkenalkan penggunaan drone untuk distribusi medis ke wilayah terpencil, meskipun masih berskala terbatas (Scott & Scott, 2017).

Memasuki 2020an, krisis iklim dan gangguan rantai pasok global memperlihatkan kerentanan sistem yang bergantung pada infrastruktur terestrial. Laporan Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) menegaskan meningkatnya risiko kerusakan infrastruktur akibat perubahan iklim, sementara kajian Ivanov dan Dolgui (2020) menunjukkan bahwa gangguan simultan pada jaringan logistik dapat memicu kegagalan sistemik. Kondisi ini menandakan perlunya transformasi menuju sistem infrastruktur yang lebih adaptif dan tidak sepenuhnya bergantung pada stabilitas daratan.



Gambar 2. 2 Tipologi Infrastruktur Kemanusiaan

(Sumber: Visual oleh Penulis, 2026)

Dari pembacaan historis terlihat pola evolusi yang konsisten: infrastruktur kemanusiaan berkembang dari kamp darurat sederhana, menuju sistem logistik terorganisir, hingga integrasi multimoda dan teknologi udara. Namun, sistem ini masih bersifat reaktif, bergantung pada distribusi eksternal, dan belum memiliki kapasitas produksi sumber daya secara mandiri. Udara pun masih diposisikan sebagai jalur transportasi, bukan ruang operasional arsitektural.

Dengan demikian, transformasi infrastruktur kemanusiaan merupakan proses evolusioner yang terus merespons karakter krisis. Pengembangan model hibrida darat–udara dapat dipahami sebagai kelanjutan logis dari evolusi tersebut untuk menghadapi krisis iklim dan disrupsi sistemik abad ke21 yang semakin kompleks.

2.1.3 Tipologi Infrastruktur Berbasis Konvensional

Tipologi infrastruktur kemanusiaan berbasis darat merupakan bentuk dominan dalam respons krisis global, dengan sistem operasional yang bergantung pada stabilitas teritorial dan jaringan transportasi permukaan. Literatur logistik kemanusiaan menunjukkan bahwa sistem ini dibangun atas paradigma distribusi terpusat dan efisiensi rantai pasok (Van Wassenhove, 2006; Balcik et al., 2010). Tipologi umumnya meliputi kamp pengungsian, gudang logistik, dapur umum, shelter modular, dan *humanitarian logistics base*, yang semuanya bertumpu pada daratan sebagai medium operasional.

Kamp pengungsian merupakan tipologi paling awal dan paling luas digunakan dalam situasi perpindahan populasi akibat konflik atau bencana. Menurut Corsellis dan Vitale (2005), kamp dirancang dengan prinsip konsentrasi populasi untuk memudahkan distribusi bantuan dan layanan dasar. Organisasi ruang biasanya berbentuk zonasi fungsional dengan pola sirkulasi grid atau linear untuk memastikan aksesibilitas dan kontrol logistik. Namun, studi Davis (2015) menunjukkan bahwa konfigurasi ini cenderung bersifat distribusional dan tidak memiliki kapasitas produksi sumber daya secara mandiri.

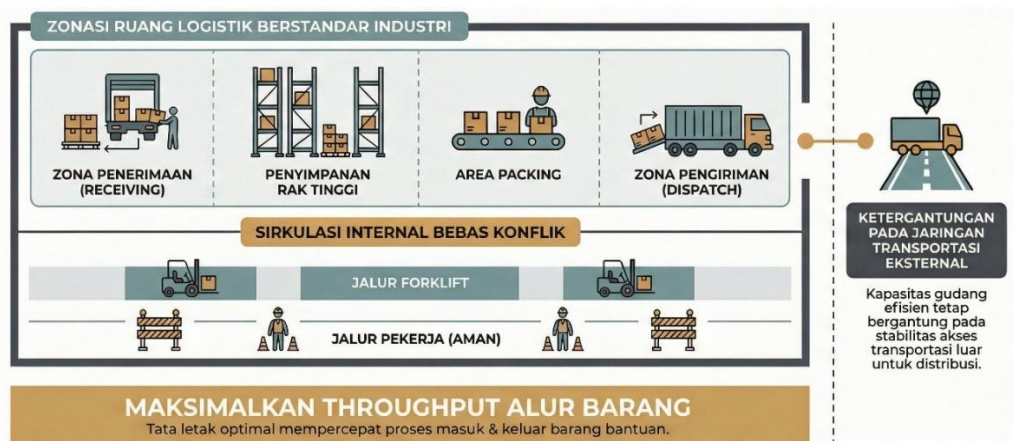


Gambar 2. 3 Prinsip Spasial Kamp pada Infrastruktur Kemanusiaan

(Sumber: Visual oleh Penulis, 2026)

Gudang logistik kemanusiaan berkembang seiring profesionalisasi manajemen rantai pasok. Pendekatan *supply chain management* meningkatkan efisiensi respons bencana melalui organisasi ruang yang mengikuti prinsip logistik industri: zona penerimaan, penyimpanan rak tinggi, area *picking-packing*, dan *dispatch* (Van Wassenhove, 2006).

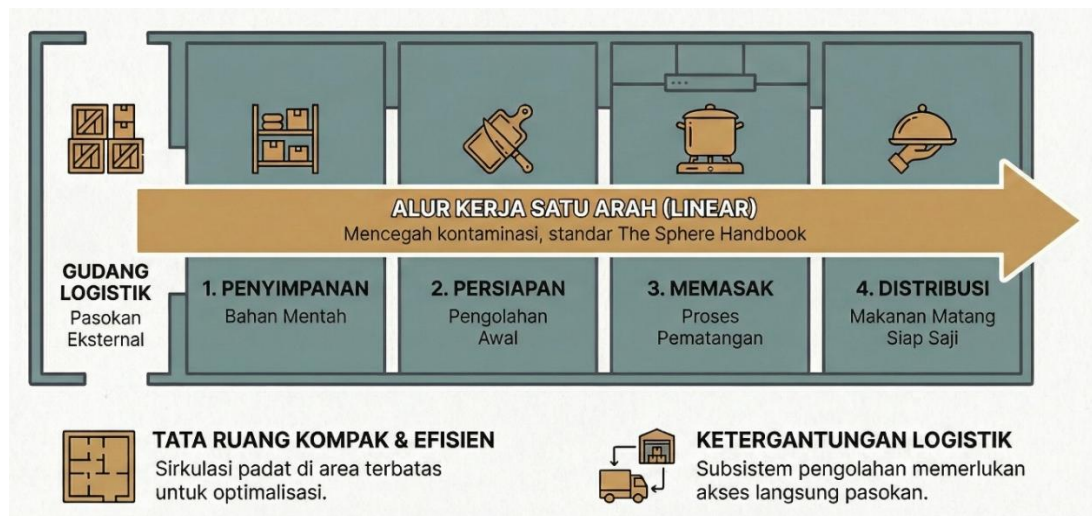
Sirkulasi dirancang untuk memaksimalkan alur barang dan meminimalkan konflik operasional. Namun, meskipun sistem penyimpanan modern memungkinkan kontrol stok yang presisi, operasionalnya tetap bergantung pada stabilitas jaringan transportasi eksternal (Balcik et al., 2010). Ketika jalur distribusi terganggu, kapasitas gudang menjadi tidak optimal karena tidak memiliki mekanisme produksi atau substitusi internal.



Gambar 2. 4 Prinsip Spasial Sistem Logistik pada Infrastruktur Kemanusiaan

(Sumber: Visual oleh Penulis, 2026)

Dapur umum (field kitchen atau community kitchen) merupakan tipologi pelayanan langsung yang berfungsi sebagai unit pengolahan dalam rantai distribusi pangan. Menurut Sphere Association (2018) dalam *The Sphere Handbook*, dapur umum dirancang dengan alur kerja satu arah untuk menjaga standar higienitas: penyimpanan bahan mentah, persiapan, memasak, hingga distribusi. Organisasi ruangnya relatif kompak dengan sirkulasi linear. Namun, dapur umum tidak memproduksi bahan pangan primer; ia sepenuhnya bergantung pada pasokan dari gudang logistik. Dalam kerangka metabolisme sistem, dapur umum hanyalah subsistem pengolahan, bukan produsen sumber daya.



Gambar 2. 5 Rantai Kerja Pasokan Pangan saat Bencana

(Sumber: Visual oleh Penulis, 2026)

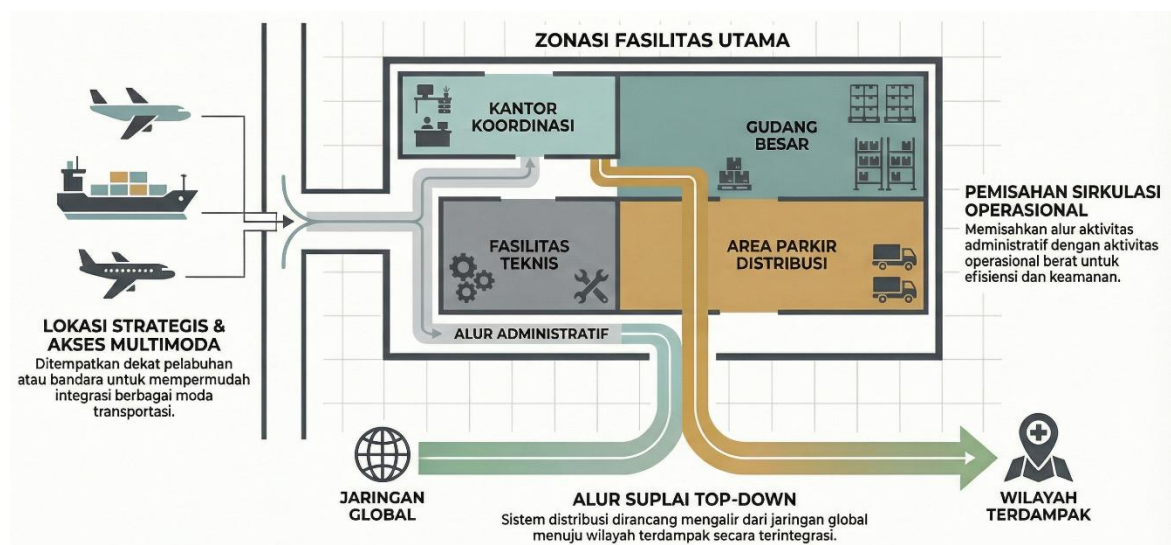
Shelter modular dikembangkan untuk meningkatkan kecepatan respons dan fleksibilitas konstruksi. Johnson (2007) dalam kajian tentang prefabricated disaster housing menunjukkan bahwa sistem modular memungkinkan transportasi komponen dalam volume besar dan perakitan cepat di lokasi krisis. Organisasi ruang shelter bersifat minimalis, dengan fokus pada perlindungan iklim dan privasi dasar. Meskipun beberapa inovasi mengintegrasikan panel surya atau sistem ventilasi pasif, secara umum shelter modular tetap menjadi unit hunian pasif yang tidak terhubung dalam sistem produksi kolektif. Ketergantungannya pada suplai eksternal tetap tinggi, baik untuk pangan, air, maupun energi.



Gambar 2. 6 Elemen Spasial Shelter untuk Bencana Alam

(Sumber: Visual oleh Penulis, 2026)

Humanitarian logistics base merupakan tipologi yang lebih kompleks dan berfungsi sebagai pusat koordinasi regional. Jahre dan Heigh (2008) menjelaskan bahwa basis ini biasanya ditempatkan dekat pelabuhan atau bandara untuk memfasilitasi integrasi multimoda. Organisasi ruangnya mencakup kantor koordinasi, gudang besar, area parkir kendaraan distribusi, serta fasilitas teknis. Sirkulasi dirancang untuk memisahkan aktivitas administratif dan operasional berat. Sistem suplai mengikuti model topdown dari jaringan global menuju wilayah terdampak. Meskipun lebih terintegrasi secara manajerial, basis logistik tetap mengandalkan stabilitas wilayah dan keamanan jalur distribusi.



Dari analisis tipologi tersebut, dapat diidentifikasi empat aspek utama. Pertama, organisasi ruang berorientasi pada efisiensi distribusi dan pemisahan fungsi. Kedua, sirkulasi dirancang untuk mempercepat alur barang dari penyimpanan ke penerima. Ketiga, sistem penyimpanan menjadi komponen inti dalam menjaga ketersediaan stok. Keempat, sistem suplai selalu bersifat eksternal dan bergantung pada jaringan darat atau laut yang stabil. Literatur mengenai resilience supply chain menunjukkan bahwa sistem yang terlalu terpusat rentan terhadap gangguan simultan (Ivanov & Dolgui, 2020).

Keterbatasan tipologi berbasis darat menjadi semakin terlihat dalam konteks krisis multidimensi. Pertama, tidak adanya integrasi produksi menyebabkan ketergantungan absolut pada suplai eksternal. Kedua, stabilitas wilayah menjadi prasyarat operasional; konflik atau bencana yang merusak infrastruktur transportasi langsung memutus rantai distribusi. Ketiga, kerentanan terhadap isolasi geografis meningkat dalam konteks perubahan iklim, sebagaimana ditegaskan oleh Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) yang memproyeksikan peningkatan frekuensi bencana ekstrem. Keempat, tidak adanya mobilitas sistemik menyebabkan relokasi memerlukan waktu dan sumber daya besar.

Dengan demikian, tipologi infrastruktur kemanusiaan berbasis darat, meskipun telah mengalami peningkatan manajerial dan teknis, masih beroperasi dalam paradigma distribusi reaktif dan ketergantungan teritorial. Keterbatasan struktural tersebut membuka ruang konseptual bagi eksplorasi tipologi alternatif yang lebih adaptif, terintegrasi secara metabolik, dan memiliki tingkat mobilitas sistemik yang lebih tinggi dalam merespons krisis global yang semakin kompleks.

2.1.4 Regulasi dan Standar Infrastruktur Kemanusiaan

Regulasi dan standar infrastruktur kemanusiaan merupakan kerangka normatif yang mengatur keselamatan, kapasitas pelayanan, distribusi sumber daya, serta kualitas lingkungan dalam situasi krisis. Standar ini disusun untuk memastikan bahwa respons kemanusiaan memenuhi prinsip kemanusiaan, akuntabilitas, dan perlindungan hak dasar penyintas. Literatur internasional menunjukkan bahwa standar tersebut berkembang melalui pengalaman krisis besar dan konsensus antarorganisasi global. Beberapa rujukan utama meliputi *The Sphere Handbook* (Sphere Association, 2018), pedoman logistik kemanusiaan

dalam literatur manajemen rantai pasok (Van Wassenhove, 2006; Balcik et al., 2010), serta pedoman teknis air dan sanitasi dari WHO dan UNICEF (Howard & Bartram, 2003).

a. Standar Keselamatan

Standar keselamatan dalam infrastruktur kemanusiaan mencakup perlindungan terhadap risiko kebakaran, kepadatan berlebih, kekerasan berbasis gender, serta risiko kesehatan lingkungan. *The Sphere Handbook* menetapkan jarak minimum antar shelter untuk mencegah penyebaran api, sistem pencahayaan memadai untuk keamanan malam hari, serta akses jalur evakuasi yang jelas (Sphere Association, 2018). Dalam konteks kamp pengungsian, kepadatan populasi diatur agar tidak melampaui kapasitas lahan yang dapat menimbulkan risiko epidemiologis.

Selain itu, aspek keselamatan struktural pada shelter modular merujuk pada standar ketahanan terhadap angin dan hujan, terutama di wilayah rawan badai atau gempa (Johnson, 2007). Namun, standar keselamatan ini umumnya dirancang berdasarkan asumsi bahwa infrastruktur berada pada daratan yang relatif stabil, dengan risiko yang dapat dipetakan secara konvensional.

b. Standar Kapasitas

Standar kapasitas berkaitan dengan jumlah populasi yang dapat dilayani oleh suatu infrastruktur dalam periode tertentu. Sphere (2018) menetapkan rasio minimum luas hunian per individu (3,5 m² per orang untuk ruang tertutup), rasio toilet per jumlah pengguna, serta kapasitas distribusi air minimal 15 liter per orang per hari. Dalam konteks gudang logistik, literatur manajemen rantai pasok menekankan pentingnya kapasitas penyimpanan yang memadai untuk menjaga buffer stock dalam menghadapi ketidakpastian permintaan (Van Wassenhove, 2006).

Standar kapasitas ini pada dasarnya berbasis pendekatan kuantitatif yang mengasumsikan kestabilan distribusi suplai dari luar wilayah terdampak. Buffer stock dan sistem replenishment dirancang untuk mengatasi fluktuasi jangka pendek, bukan gangguan sistemik berkepanjangan.

c. Standar Distribusi Pangan

Distribusi pangan dalam konteks kemanusiaan diatur melalui pedoman gizi dan keamanan pangan. Sphere (2018) menetapkan standar asupan energi minimal sekitar 2.100 kilokalori per orang per hari, dengan komposisi makronutrien seimbang. FAO dan WFP dalam berbagai publikasi akademik menekankan pentingnya sistem distribusi yang adil, transparan, dan responsif terhadap kebutuhan kelompok rentan (Maxwell & Parker, 2012).

Secara operasional, distribusi pangan dilakukan melalui titik distribusi terpusat atau sistem voucher. Sistem ini memerlukan rantai pasok yang stabil dari gudang regional ke lokasi terdampak. Dalam konteks krisis berkepanjangan atau konflik aktif, distribusi pangan menjadi sangat rentan terhadap gangguan akses transportasi.

d. Standar Sanitasi dan Air

Standar air, sanitasi, dan higiene (WASH) merupakan komponen krusial dalam mencegah wabah penyakit. WHO dan UNICEF menetapkan indikator kualitas air minum, termasuk batas maksimum kontaminan biologis dan kimia (Howard & Bartram, 2003). Sphere (2018) menetapkan rasio minimal satu toilet untuk 20 orang serta jarak maksimum 500 meter dari hunian ke sumber air.

Organisasi ruang fasilitas sanitasi dirancang untuk menjaga privasi dan keamanan, terutama bagi perempuan dan anak-anak. Namun, seluruh sistem sanitasi ini diasumsikan terhubung dengan sistem pengolahan limbah berbasis darat, baik berupa septic tank sementara maupun sistem drainase terbuka yang terkontrol.

Meskipun regulasi dan standar tersebut telah teruji dalam berbagai konteks krisis, terdapat sejumlah pertanyaan kritis dalam menghadapi perubahan karakter krisis global saat ini.

Banyak standar disusun dalam kerangka respons darurat jangka pendek. Sphere (2018) secara eksplisit memposisikan standar sebagai pedoman minimum dalam fase tanggap darurat. Namun, dalam konteks krisis iklim yang bersifat berulang dan berkepanjangan, asumsi temporer menjadi problematis. Laporan Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) menunjukkan bahwa banyak wilayah akan mengalami bencana berulang dengan

interval yang semakin pendek. Dalam situasi ini, standar berbasis respons jangka pendek perlu direvisi menuju pendekatan yang lebih berorientasi pada keberlanjutan sistemik.

Sebagian besar standar keselamatan, kapasitas, dan sanitasi mengasumsikan ketersediaan lahan yang aman, akses transportasi darat, serta kondisi geografis yang dapat diprediksi. Literatur mengenai resilience supply chain (Ivanov & Dolgui, 2020) menunjukkan bahwa gangguan simultan pada berbagai node distribusi dapat menyebabkan kegagalan sistemik. Standar yang terlalu berorientasi pada stabilitas node darat menjadi kurang adaptif terhadap skenario isolasi geografis total, seperti wilayah kepulauan terputus atau kawasan pesisir yang terendam.

Hingga saat ini, regulasi kemanusiaan lebih banyak mengatur aspek distribusi melalui udara dalam konteks transportasi, bukan sebagai domain spasial operasional. Penggunaan drone untuk distribusi medis telah dibahas dalam literatur teknologi (Scott & Scott, 2017), namun belum terintegrasi dalam standar arsitektural atau tata ruang kemanusiaan. Domain udara belum diperlakukan sebagai ruang yang dapat menampung fungsi produksi, hunian, atau sistem metabolik tertutup. Regulasi penerbangan sipil lebih berfokus pada keselamatan navigasi daripada integrasi infrastruktur kemanusiaan berbasis udara.

Dari analisis ini dapat disimpulkan bahwa regulasi dan standar infrastruktur kemanusiaan saat ini masih berakar pada paradigma distribusi terestrial dan respons temporer. Meskipun efektif dalam konteks darurat konvensional, kerangka normatif tersebut belum sepenuhnya adaptif terhadap krisis permanen, disrupsi sistemik, dan potensi pemanfaatan domain udara sebagai ruang operasional arsitektural. Kondisi ini membuka ruang konseptual untuk mengeksplorasi reformulasi standar yang lebih resilien, integratif, dan responsif terhadap dinamika krisis abad ke-21.

2.1.5 Sistem Operasional dan Manajemen Infrastruktur

Sistem operasional infrastruktur kemanusiaan pada dasarnya dibangun di atas model distribusi linear yang mengalir dari sumber bantuan menuju penerima akhir melalui serangkaian simpul logistik. Literatur manajemen logistik kemanusiaan menunjukkan bahwa pendekatan ini mengadopsi prinsip supply chain konvensional, dengan tahapan utama berupa pengadaan (procurement), penyimpanan (warehousing), transportasi

(transportation), dan distribusi akhir (lastmile delivery) (Van Wassenhove, 2006; Balcik et al., 2010). Model ini efektif dalam kondisi stabil karena memungkinkan koordinasi lintas aktor dan optimalisasi biaya, namun secara struktural sangat bergantung pada keberfungsian setiap simpul dalam rantai tersebut.

Dalam model distribusi linear, alur bantuan dimulai dari donor internasional baik negara, organisasi multilateral, maupun lembaga filantropi yang menyediakan pendanaan atau barang. Bantuan kemudian dikonsolidasikan melalui pusat logistik regional sebelum dikirim ke wilayah terdampak. Proses ini mencerminkan arsitektur sistem yang bersifat topdown dan terpusat. Jahre dan Heigh (2008) menekankan bahwa koordinasi antarorganisasi menjadi tantangan utama dalam sistem ini, karena banyak aktor beroperasi secara paralel dengan mekanisme pelaporan dan akuntabilitas yang berbeda. Akibatnya, sistem manajemen sering kali lebih berorientasi pada kepatuhan administratif dibandingkan adaptasi kontekstual.



Rantai pasok konvensional dalam konteks kemanusiaan mengandalkan jaringan transportasi global yang kompleks. Studi oleh Kovács dan Spens (2007) menunjukkan bahwa meskipun logistik kemanusiaan memiliki karakteristik unik seperti ketidakpastian permintaan dan urgensi tinggi struktur dasarnya tetap menyerupai supply chain komersial. Barang diproduksi atau dibeli di satu lokasi, disimpan di gudang regional, lalu didistribusikan ke lokasi krisis. Ketergantungan pada pelabuhan, bandara, jalan raya, dan sistem bea cukai menjadi bagian integral dari operasional. Ketika salah satu komponen ini terganggu, keseluruhan sistem mengalami perlambatan atau kegagalan.

Ketergantungan terhadap donor dan logistik global memperkuat karakter eksternal sistem. Funding cycle yang bergantung pada komitmen donor sering kali bersifat tahunan atau berbasis proyek, bukan jangka panjang. Maxwell dan Parker (2012) menunjukkan bahwa fluktuasi pendanaan dapat memengaruhi kontinuitas distribusi pangan, terutama dalam krisis berkepanjangan. Selain itu, ketergantungan pada produksi global misalnya impor bahan pangan atau obat-obatan membuat sistem sensitif terhadap disrupsi perdagangan internasional, fluktuasi harga, dan kebijakan proteksionis.

Pola manajemen sentralistik juga menjadi ciri dominan. Keputusan strategis biasanya diambil oleh kantor pusat organisasi internasional, sementara unit lapangan berperan sebagai pelaksana. Struktur ini memudahkan standarisasi prosedur, tetapi dapat mengurangi fleksibilitas lokal. Dalam literatur resilience supply chain, Ivanov dan Dolgui (2020) menjelaskan bahwa sistem dengan sentralisasi tinggi cenderung memiliki titik kegagalan tunggal (single point of failure). Ketika pusat logistik atau koordinasi mengalami gangguan, kemampuan respons seluruh jaringan melemah.

Evaluasi terhadap sistem operasional ini menunjukkan beberapa kerentanan mendasar. Pertama, sistem tidak resilien terhadap isolasi jangka panjang. Model distribusi linear dirancang untuk memulihkan kondisi normal secepat mungkin, bukan untuk mempertahankan operasional dalam kondisi terputus total selama periode lama. Dalam konteks krisis iklim yang diproyeksikan meningkat intensitas dan frekuensinya oleh Intergovernmental Panel on Climate Change (2023), asumsi pemulihan cepat menjadi semakin tidak realistis.

Kedua, kerusakan infrastruktur fisik seperti runtuhnya jembatan, pelabuhan, atau bandara dapat memutus rantai pasok secara menyeluruh. Tanpa jalur alternatif atau kapasitas produksi lokal, distribusi bantuan berhenti. Ketiga, gangguan geopolitik seperti konflik bersenjata, sanksi ekonomi, atau pembatasan perdagangan dapat menghambat arus logistik internasional. Literatur mengenai humanitarian access menunjukkan bahwa akses kemanusiaan sering menjadi isu politik dalam konflik kontemporer (Fast, 2014). Dalam situasi demikian, sistem yang sangat bergantung pada jaringan global menjadi rentan terhadap dinamika politik yang tidak dapat dikendalikan oleh aktor kemanusiaan.

Dari perspektif sistem, karakter linear, sentralistik, dan eksternalistik ini menunjukkan bahwa infrastruktur kemanusiaan belum beroperasi sebagai sistem metabolik tertutup. Ia tidak memproduksi energi, pangan, atau air secara mandiri; tidak memiliki siklus internal yang mampu mempertahankan fungsi dasar tanpa input eksternal; dan tidak dirancang untuk mobilitas sistemik ketika tapak menjadi tidak layak. Ketergantungan pada alur suplai global menjadikan sistem ini efektif dalam kondisi stabil, namun rapuh dalam kondisi disrupsi simultan.

Analisis ini membuka ruang konseptual untuk mengeksplorasi model alternatif yang lebih resilien, desentralistik, dan terintegrasi secara metabolik. Konsep sistem metabolisme tertutup yang mengintegrasikan produksi, distribusi, dan konsumsi dalam satu kesatuan arsitektural dapat menjadi arah pengembangan untuk mengurangi ketergantungan pada rantai pasok global. Dengan demikian, reformulasi sistem operasional tidak hanya menyangkut efisiensi distribusi, tetapi transformasi paradigma dari model linear menuju model sirkular dan otonom yang lebih adaptif terhadap krisis multidimensi abad ke-21.

2.1.6 Pengguna dan Aktor Infrastruktur Kemanusiaan

Infrastruktur kemanusiaan tidak hanya terdiri atas sistem fisik dan teknis, tetapi juga dibentuk oleh relasi antar pengguna dan aktor yang terlibat di dalamnya. Ia merupakan ekosistem sosialoperasional yang mempertemukan berbagai kepentingan, kapasitas, dan kebutuhan dalam satu sistem respons krisis. Oleh karena itu, pemahaman terhadap struktur aktor dan pola interaksinya menjadi aspek fundamental dalam perencanaan dan perancangan infrastruktur kemanusiaan.

Sphere Association (2018) mengidentifikasi masyarakat terdampak krisis sebagai pengguna utama infrastruktur kemanusiaan. Kelompok ini meliputi pengungsi, korban bencana alam, masyarakat terdampak konflik, serta komunitas rentan lainnya. Kebutuhan mereka mencakup akses terhadap shelter yang aman dan layak, air bersih, sanitasi, pangan, layanan kesehatan, serta ruang yang mendukung keamanan dan martabat manusia. Dalam konteks ini, pengguna bukan sekadar penerima bantuan pasif, melainkan subjek yang memiliki hak, preferensi budaya, struktur sosial, dan aspirasi jangka panjang. Standar Sphere menekankan pentingnya pendekatan berbasis hak (*rightsbased approach*) dan

partisipasi komunitas dalam proses perencanaan, agar infrastruktur yang dibangun sesuai dengan konteks sosial dan kebutuhan nyata di lapangan.

Di sisi lain, terdapat aktor pengelola yang menjalankan fungsi perencanaan, koordinasi, distribusi, dan pemeliharaan infrastruktur. Aktor ini mencakup lembaga kemanusiaan internasional (seperti UN agencies dan IFRC), pemerintah nasional dan daerah, organisasi nonpemerintah (NGO), lembaga lokal, sektor swasta, serta relawan. Masing-masing memiliki mandat, kapasitas sumber daya, serta struktur organisasi yang berbeda. Dalam situasi krisis berskala besar, sistem koordinasi sering kali menggunakan pendekatan *cluster system* yang membagi tanggung jawab berdasarkan sektor seperti shelter, WASH (water, sanitation, and hygiene), logistik, kesehatan, dan perlindungan.

Hubungan antara pengguna dan aktor pengelola membentuk sistem kemanusiaan yang bersifat kolaboratif sekaligus hierarkis. Di satu sisi, terdapat struktur komando dan koordinasi yang diperlukan untuk memastikan respons berjalan cepat dan terorganisasi. Di sisi lain, efektivitas sistem sangat bergantung pada partisipasi dan kepercayaan komunitas terdampak. Ketidakseimbangan relasi kekuasaan dapat memengaruhi distribusi bantuan, akses terhadap sumber daya, serta kualitas pelayanan. Oleh karena itu, transparansi, akuntabilitas, dan komunikasi dua arah menjadi elemen penting dalam sistem ini.

Selain dua kelompok utama tersebut, terdapat pula aktor pendukung yang berperan dalam keberlanjutan sistem, seperti penyedia logistik, perusahaan transportasi, penyedia teknologi komunikasi, serta lembaga donor. Donor memiliki pengaruh signifikan dalam menentukan prioritas program dan alokasi sumber daya, sehingga secara tidak langsung memengaruhi konfigurasi infrastruktur yang dibangun. Sementara itu, aktor lokal termasuk komunitas adat, pemimpin masyarakat, dan organisasi berbasis komunitas memiliki peran krusial dalam memastikan bahwa intervensi eksternal selaras dengan nilai dan struktur sosial setempat.

Dalam perspektif arsitektural, keberagaman aktor ini memiliki implikasi langsung terhadap kebutuhan ruang dan organisasi spasial. Infrastruktur kemanusiaan harus mampu mengakomodasi berbagai alur aktivitas: distribusi logistik, pelayanan medis, koordinasi administratif, hingga aktivitas sosial komunitas. Ruang gudang memerlukan akses transportasi yang efisien; ruang layanan kesehatan memerlukan zonasi higienis dan privat;

ruang komunitas memerlukan fleksibilitas untuk aktivitas sosial dan pemulihan psikososial. Tanpa pemetaan aktor dan alur kerja yang jelas, sistem spasial dapat menjadi tidak efisien atau bahkan menimbulkan konflik fungsi.

Lebih lanjut, pendekatan partisipatif dalam perancangan menjadi strategi penting untuk menjembatani kebutuhan pengguna dan kapasitas aktor pengelola. Partisipasi tidak hanya berarti konsultasi formal, tetapi juga keterlibatan aktif masyarakat dalam proses konstruksi, pemeliharaan, dan adaptasi infrastruktur. Pendekatan ini memperkuat rasa kepemilikan (*sense of ownership*) dan meningkatkan keberlanjutan sistem dalam jangka panjang.

Secara keseluruhan, pengguna dan aktor infrastruktur kemanusiaan membentuk jaringan relasional yang kompleks. Infrastruktur tidak dapat dipisahkan dari dinamika sosial, politik, dan kelembagaan yang melingkupinya. Oleh karena itu, perancangan infrastruktur kemanusiaan harus mempertimbangkan struktur peran, alur koordinasi, serta kebutuhan spasial masing-masing aktor agar sistem dapat berfungsi secara efektif, adil, dan manusiawi dalam menghadapi situasi krisis.

2.2 Sistem Produksi Pangan Tanpa Tanah

2.5.1 Teori Ketahanan Pangan

Teori ketahanan pangan (*food security theory*) menempatkan pangan sebagai elemen fundamental bagi keberlangsungan hidup, stabilitas sosial, dan martabat manusia. Food and Agriculture Organization (FAO, 2017) mendefinisikan ketahanan pangan sebagai kondisi ketika seluruh manusia, setiap saat, memiliki akses fisik, sosial, dan ekonomi terhadap pangan yang cukup, aman, dan bergizi untuk hidup aktif dan sehat. Definisi ini menegaskan pangan sebagai hak dasar yang harus dijamin, termasuk dalam situasi krisis.

Secara konseptual, ketahanan pangan bertumpu pada empat pilar: ketersediaan (*availability*), akses (*access*), pemanfaatan (*utilization*), dan stabilitas (*stability*). Ketersediaan berkaitan dengan keberadaan pangan secara fisik melalui produksi, cadangan, atau distribusi. Akses menyangkut kemampuan memperoleh pangan yang dipengaruhi faktor ekonomi, sosial, dan geografis. Pemanfaatan menekankan kualitas, keamanan, dan nilai gizi pangan. Stabilitas merujuk pada keberlanjutan ketiga aspek tersebut dalam jangka panjang tanpa terganggu krisis, konflik, atau bencana.

Dalam konteks krisis kemanusiaan, keempat pilar ini sering terganggu secara bersamaan. Karena itu, teori ketahanan pangan menekankan adaptivitas sistem melalui diversifikasi sumber, fleksibilitas rantai pasok, dan pengelolaan cadangan yang responsif. Pendekatan ini mendorong sistem produksi terdesentralisasi dan berbasis lokal seperti pertanian urban atau teknologi pangan portabel untuk mengurangi ketergantungan pada distribusi global yang rentan.

Dalam kerangka infrastruktur kemanusiaan, ketahanan pangan menjadi dasar integrasi fungsi produksi, pengolahan, dan distribusi dalam satu sistem ruang yang adaptif. Dengan mempertimbangkan dimensi sosial dan budaya masyarakat, pendekatan ini mengarah pada sistem pangan yang fleksibel, kontekstual, dan berkelanjutan di tengah ketidakpastian.

2.2.2 Teori Urban Agriculture & Alternative Farming

Urban agriculture dan *alternative farming* berkembang sebagai respons terhadap urbanisasi, keterbatasan lahan, dan meningkatnya kebutuhan pangan di kota. Produksi pangan tidak lagi terpisah di wilayah rural, melainkan terintegrasi dalam sistem ruang perkotaan sehingga mendekatkan produksi dan konsumsi serta memperpendek rantai distribusi.

Menurut Dominic Specht dkk. (2014), urban agriculture berpotensi meningkatkan ketahanan pangan melalui pemanfaatan ruang terbatas seperti atap, fasad, lahan kosong, hingga interior bangunan. Arsitektur pun berfungsi ganda sebagai ruang hunian sekaligus ruang produksi. Praktik seperti *rooftop garden*, *vertical farming*, hidroponik, dan akuaponik menunjukkan bahwa kota dapat menjadi sistem produktif, bukan sekadar konsumtif.

Sementara itu, *alternative farming* menekankan metode nonkonvensional berbasis teknologi seperti hidroponik, aeroponik, akuaponik, dan *controlled environment agriculture* yang memungkinkan produksi tanpa tanah dengan efisiensi air, nutrisi, dan ruang. Sistem pencahayaan buatan, sensor, dan otomatisasi mendukung hasil panen optimal dalam ruang terbatas.

Dalam konteks krisis kemanusiaan, pendekatan ini relevan karena memungkinkan produksi pangan lokal yang modular dan terkontrol, bahkan di infrastruktur sementara atau wilayah terdampak. Selain itu, urban agriculture memiliki dampak sosioekologis:

memperkuat komunitas, mengurangi emisi transportasi, meningkatkan kualitas udara, serta memperbaiki iklim.

Secara arsitektural, konsep ini memperluas peran bangunan menjadi sistem ekologis yang produktif. Ruang dirancang dengan mempertimbangkan cahaya, irigasi, ventilasi, dan struktur tanaman. Bahkan dalam skenario nonterestrial atau platform bergerak, sistem pertanian modular membuka kemungkinan produksi pangan di lokasi ekstrem.

Dengan demikian, urban agriculture dan alternative farming membentuk paradigma baru: arsitektur sebagai bagian aktif dari ekosistem pangan yang adaptif, terintegrasi, dan berorientasi pada ketahanan.

2.2.3 Teknologi Produksi Pangan Tanpa Tanah

Teknologi produksi pangan tanpa tanah berkembang sebagai respons atas keterbatasan lahan, degradasi kualitas tanah, dan tekanan terhadap sistem pertanian konvensional. Pendekatan ini menggantikan tanah dengan sistem terkontrol berbasis air, nutrisi, dan rekayasa lingkungan, sehingga produksi bergeser dari ketergantungan pada kondisi alam menuju pengelolaan biologis yang presisi dan efisien.

Melalui konsep *vertical farming*, Dickson Despommier (2010) menunjukkan bahwa produksi pangan dapat diintegrasikan ke dalam bangunan secara bertingkat. Model vertikal ini memaksimalkan efisiensi ruang, memungkinkan kontrol cahaya, suhu, dan kelembapan, serta meminimalkan kehilangan hasil. Dengan demikian, ruang arsitektural bertransformasi menjadi ruang produksi intensif yang terkontrol.

Hidroponik memanfaatkan larutan nutrisi dalam sistem sirkulasi tertutup sehingga konsumsi air lebih rendah dan lebih efisien. Aeroponik, dengan akar tanaman yang menggantung dan disemprot kabut nutrisi, meningkatkan suplai oksigen dan mempercepat pertumbuhan. Hussein AlChalabi (2015) menekankan bahwa sistem tanpa tanah unggul dalam efisiensi air, presisi nutrisi, dan fleksibilitas lokasi, sehingga dapat diterapkan di lingkungan urban, wilayah ekstrem, maupun ruang tertutup yang sepenuhnya dikendalikan.

Selain tanaman hortikultura, produksi mikroalga dalam fotobioreaktor menghasilkan biomassa tinggi dalam ruang kecil serta berpotensi terintegrasi dengan sistem energi dan

pengelolaan karbon dalam satu siklus tertutup. Hal ini memperkuat kemungkinan terbentuknya ekosistem produksi yang sirkular.

Dalam konteks krisis kemanusiaan, sistem tanpa tanah bersifat modular, ringan, dan tidak bergantung pada kualitas lahan, sehingga dapat dioperasikan pada infrastruktur sementara atau bergerak, bahkan selama mobilisasi. Secara arsitektural, pendekatan ini menuntut desain ruang terkontrol yang mengintegrasikan struktur vertikal, pencahayaan buatan, ventilasi, serta sistem air dan energi secara terpadu.

Dengan demikian, teknologi produksi pangan tanpa tanah tidak hanya meningkatkan efisiensi ruang dan sumber daya, tetapi juga membuka peluang produksi berkelanjutan dalam kondisi ekstrem, mendukung sistem pangan yang tangguh, terdesentralisasi, dan adaptif.

2.2.4 Integrasi Sistem Produksi dengan Arsitektur

Integrasi sistem produksi pangan dengan arsitektur menandai pergeseran paradigma perancangan dari bangunan sebagai wadah pasif menjadi sistem aktif yang mendukung keberlangsungan hidup. Produksi pangan dipahami sebagai bagian dari sistem ruang yang membentuk program arsitektur dan organisasi fungsi. Specht et al. (2014) menegaskan bahwa integrasi ini memungkinkan terciptanya sistem pangan yang lebih resilien dan berkelanjutan.

Dalam konteks infrastruktur kemanusiaan, integrasi produksi pangan dengan arsitektur memungkinkan terciptanya sistem mandiri yang tidak sepenuhnya bergantung pada rantai pasok eksternal. Arsitektur berperan sebagai medium yang mengoordinasikan sistem produksi, distribusi, dan konsumsi pangan secara efisien. Pendekatan ini memperkuat gagasan bahwa arsitektur dan infrastruktur kemanusiaan dapat berfungsi sebagai sistem metabolik yang mendukung kehidupan dalam kondisi krisis.

2.3 Sistem Energi Mandiri dan Metabolisme Tertutup

2.3.1 Konsep Metabolisme Arsitektur

Konsep metabolisme arsitektur memandang bangunan sebagai organisme buatan yang memiliki siklus input–output layaknya sistem biologis. Bangunan tidak lagi dipahami sebagai objek statis, melainkan sebagai sistem dinamis yang menerima, mengolah, dan

mengeluarkan energi, air, material, serta limbah secara terintegrasi. Ken Yeang (1999) menegaskan bahwa arsitektur berkelanjutan harus mempertimbangkan keseluruhan aliran tersebut agar bangunan tidak hanya mengonsumsi sumber daya, tetapi juga mengelola dan meminimalkan dampak ekologisnya.

Metabolisme arsitektur mencakup sistem energi, air, dan material dalam satu jaringan performatif. Desain berfokus pada efisiensi sistemik seperti orientasi matahari, ventilasi alami, pengelolaan air hujan, integrasi vegetasi, serta siklus hidup material sehingga bangunan selaras dengan siklus ekologis dan mengurangi ketergantungan pada pasokan eksternal.

Dalam konteks infrastruktur kemanusiaan, pendekatan ini relevan karena fasilitas sering beroperasi dalam kondisi terbatas dan ekstrem. Bangunan perlu berfungsi sebagai *lifesupport system* mandiri melalui integrasi energi terbarukan, daur ulang air, pengolahan limbah, dan bahkan produksi pangan internal. Pada sistem mobile atau nonterrestrial, efisiensi dan integrasi menjadi semakin krusial karena keterbatasan ruang dan kapasitas.

Dengan demikian, metabolisme arsitektur menempatkan bangunan sebagai entitas aktif dan adaptif yang mampu mempertahankan keberlanjutan operasionalnya, sekaligus menjadi dasar konseptual bagi perancangan infrastruktur yang efisien, resilien, dan responsif terhadap kondisi ekstrem.

2.3.2 ClosedLoop System dalam Infrastruktur

Closedloop system merupakan pendekatan sistemik yang meminimalkan limbah dan ketergantungan pada sumber daya eksternal dengan mengintegrasikan siklus energi, air, dan material secara tertutup. Output suatu proses diperlakukan sebagai input bagi proses lain sehingga tercipta sirkulasi berkelanjutan. Charles J. Kibert (2016) menekankan bahwa infrastruktur berbasis sistem tertutup memungkinkan penggunaan ulang sumber daya melalui daur ulang, pemulihan energi, dan optimasi aliran material secara menyeluruh.

Secara konseptual, sistem ini berakar pada prinsip ekologi industri dan metabolisme sirkular yang meniru siklus alam tanpa limbah permanen. Air limbah dapat diolah kembali, limbah organik dikonversi menjadi kompos atau energi, dan panas buangan dimanfaatkan

sebagai sumber energi sekunder. Dengan demikian, keseimbangan internal dipertahankan melalui sirkulasi, bukan suplai baru yang terusmenerus.

Dalam arsitektur dan infrastruktur, penerapannya mencakup integrasi energi terbarukan dan penyimpanan, penangkapan serta daur ulang air, serta pengolahan limbah lokal melalui biodigester atau sistem biologis. Seluruh komponen dirancang sebagai jaringan terpadu yang saling mendukung.

Bagi infrastruktur kemanusiaan, sistem tertutup memungkinkan kemandirian operasional di wilayah terdampak bencana atau konflik, ketika pasokan eksternal terganggu. Pada konteks nonterrestrial atau sistem mobile, efisiensi dan integrasi menjadi krusial karena keterbatasan ruang dan kapasitas. Limbah konsumsi dapat mendukung produksi pangan, sementara energi surya menggerakkan sistem pencahayaan dan sirkulasi.

Dengan demikian, *closedloop system* bukan sekadar strategi teknis, tetapi kerangka konseptual untuk merancang infrastruktur yang mandiri, adaptif, dan resilien, mampu mempertahankan fungsi dasar energi, air, dan pangan dalam kondisi ekstrem.

2.3.4 Teknologi Sistem Eenergi Mandiri dan Metabolisme Tertutup

Teknologi sistem energi mandiri dalam kerangka metabolisme tertutup memposisikan arsitektur sebagai sistem metabolik yang mengelola aliran energi, air, dan material secara terintegrasi. Bangunan tidak lagi sekadar mengonsumsi sumber daya, tetapi memproduksi, menyimpan, dan mendaur ulangnya dalam satu siklus internal yang efisien dan berkelanjutan. Pendekatan ini menjadi krusial terutama dalam konteks krisis, wilayah terpencil, maupun infrastruktur mobile yang memiliki keterbatasan akses terhadap jaringan eksternal.

Pemanfaatan *renewable energy portable* seperti panel surya modular atau turbin angin skala kecil memungkinkan produksi energi langsung di lokasi secara fleksibel dan cepat. Sistem ini dapat diintegrasikan dalam *microgrid*, yaitu jaringan listrik lokal yang mampu beroperasi secara mandiri (offgrid) maupun terhubung dengan jaringan utama. Untuk menjaga stabilitas pasokan, penyimpanan energi melalui baterai atau sistem serupa menjadi komponen penting agar keseimbangan antara produksi dan konsumsi tetap terjaga meskipun terjadi fluktuasi sumber energi terbarukan.

Selain energi, metabolisme tertutup juga mencakup pengelolaan air melalui *closedloop water system*. Air hujan dapat ditangkap, difiltrasi, dan didaur ulang, sementara greywater diproses kembali untuk kebutuhan nonpotabel atau produksi pangan. Limbah organik tidak diperlakukan sebagai residu akhir, tetapi dapat dikonversi melalui teknologi *wastetoenergy* seperti biodigester menjadi sumber energi tambahan. Dengan demikian, setiap output dalam sistem memiliki potensi menjadi input baru.

Integrasi energi terbarukan, microgrid, penyimpanan energi, sistem air tertutup, dan konversi limbah membentuk arsitektur sebagai unit pendukung kehidupan yang otonom. Dalam kondisi ekstrem atau terisolasi, sistem ini memungkinkan infrastruktur tetap beroperasi dengan ketergantungan minimal pada pasokan eksternal. Melalui pendekatan ini, arsitektur bertransformasi menjadi sistem aktif, adaptif, dan resilien yang mempertahankan keseimbangan internalnya secara berkelanjutan.

2.3.4 Efisiensi dan Kemandirian Sistem

Efisiensi dan kemandirian sistem merupakan tujuan utama penerapan metabolisme tertutup dalam arsitektur dan infrastruktur. Efisiensi berarti memaksimalkan fungsi dengan sumber daya minimal, sedangkan kemandirian merujuk pada kemampuan sistem beroperasi tanpa ketergantungan intensif pada pasokan eksternal. Dalam kondisi krisis atau lingkungan ekstrem, kedua prinsip ini menentukan keberlangsungan operasional.

Melalui konsep *biomimicry*, Janine Benyus (1997) menekankan bahwa sistem buatan sebaiknya meniru ekosistem alami yang bekerja dalam siklus tertutup, tanpa limbah permanen, dan menjaga keseimbangan melalui relasi antarkomponen. Prinsip ini menginspirasi arsitektur yang hemat energi, memanfaatkan sumber daya lokal, dan mengintegrasikan subsistem agar saling mendukung.

Dalam arsitektur metabolik, efisiensi bersifat sistemik: penggunaan energi terbarukan, optimalisasi pencahayaan dan ventilasi alami, pengelolaan air presisi, serta daur ulang limbah dalam satu siklus terpadu. Kemandirian menjadi krusial pada infrastruktur kemanusiaan yang beroperasi di wilayah terdampak bencana atau konflik, di mana suplai energi, air, dan pangan dapat terputus sewaktu-waktu. Sistem yang mandiri mampu mempertahankan fungsi vital secara otonom.

Pada arsitektur bergerak atau nonterrestrial, tuntutan efisiensi dan kemandirian semakin tinggi karena keterbatasan ruang dan kapasitas angkut. Modul infrastruktur harus berfungsi sebagai *lifesupport unit* yang mengintegrasikan struktur, teknologi, dan sistem ekologis dalam satu kesatuan ringkas.

Dengan demikian, metabolisme tertutup yang berorientasi pada efisiensi dan kemandirian memperkuat resiliensi arsitektur. Bangunan diposisikan sebagai sistem aktif dan adaptif yang mampu menopang kehidupan serta mempertahankan fungsi vitalnya secara mandiri dalam kondisi ekstrem.

2.4 Arsitektur Pasca Tanah dan Arsitektur Melayang

2.4.1 Teori Arsitektur Futuristik & *Experimental Architecture*

Teori arsitektur futuristik dan *experimental architecture* memposisikan arsitektur sebagai medium spekulatif yang melampaui fungsi konvensional bangunan. Arsitektur dipahami sebagai sistem terbuka yang adaptif, mampu bereksperimen dan bertransformasi seiring perkembangan teknologi, mobilitas global, serta perubahan sosial dan lingkungan ekstrem. Ia tidak lagi sekadar merespons tapak tetap, tetapi mengeksplorasi kemungkinan ruang masa depan.

Perkembangannya menguat pada paruh kedua abad ke-20, ketika kemajuan industri, penerbangan, dan eksplorasi luar angkasa memicu imajinasi tentang ruang yang melampaui batas geografis. Gagasan megastruktur, kota terapung, hingga habitat luar angkasa menjadi bagian dari diskursus avantgarde. Peter Cook melalui konsep *Experimental Architecture* menempatkan arsitektur sebagai laboratorium ide. Bersama kelompok Archigram, ia mengembangkan proyek spekulatif seperti PlugIn City dan Walking City, yang menampilkan arsitektur modular, mobile, dan dapat dirakit ulang lebih menyerupai mesin atau infrastruktur dinamis daripada bangunan permanen.

Pendekatan ini menekankan fleksibilitas dibanding stabilitas. Struktur ringan, sistem prefabrikasi, dan teknologi plugin membuka kemungkinan arsitektur yang bergerak, mengapung, atau melayang. Konsep nonterrestrial pun muncul, di mana arsitektur tidak sepenuhnya bergantung pada tanah, melainkan memanfaatkan udara atau medium lain sebagai ruang hidup alternatif.

Menurut Felix Scott (2008), arsitektur futuristik berada di antara optimisme teknologi dan kritik terhadap utopia modern. Ia bukan hanya proyeksi masa depan yang visioner, tetapi juga refleksi atas dampak sosial dan ekologis modernitas. Dalam konteks krisis iklim dan keterbatasan lahan, gagasan arsitektur melayang memperoleh relevansi baru sebagai respons terhadap tekanan ekologis nyata.

Dengan demikian, arsitektur futuristik dan eksperimental mendorong pergeseran paradigma dari objek statis menuju sistem dan proses yang adaptif. Arsitektur melayang dapat dipahami sebagai ekspresi pendekatan ini sebuah model ruang yang fleksibel, terintegrasi teknologi, dan terbuka terhadap transformasi global.

2.4.2 Teori Arsitektur Adaptif

Teori arsitektur adaptif menempatkan kemampuan beradaptasi dan performa sebagai inti perancangan. Bangunan tidak dipahami sebagai objek statis yang selesai saat konstruksi, melainkan sebagai sistem dinamis yang terus berinteraksi dengan lingkungan, pengguna, dan perubahan operasional. Arsitektur diposisikan sebagai sistem terbuka yang mampu menyesuaikan diri terhadap fluktuasi iklim, perubahan fungsi, maupun dinamika sosial.

Perkembangan pendekatan ini berkaitan dengan krisis lingkungan, ketidakpastian iklim, dan tuntutan efisiensi energi. Arsitektur konvensional yang kaku sering gagal merespons kondisi ekstrem, sehingga paradigma adaptif menekankan fleksibilitas spasial, respons material, dan integrasi teknologi cerdas. Michael Hensel (2010) melalui konsep *performanceoriented architecture* menegaskan bahwa kualitas arsitektur diukur dari kinerjanya bagaimana ruang, struktur, dan material bekerja terpadu dalam mengatur suhu, cahaya, ventilasi, energi, dan kenyamanan.

Pendekatan ini menggabungkan sistem pasif dan aktif. Strategi pasif meliputi orientasi bangunan, ventilasi alami, bentuk aerodinamis, serta material responsif. Sistem aktif mencakup sensor, aktuator, dan kontrol digital yang memungkinkan penyesuaian realtime, seperti fasad kinetik atau tata ruang modular. Adaptivitas meningkatkan efisiensi sekaligus resiliensi, terutama dalam situasi krisis yang penuh ketidakpastian.

Dalam konteks arsitektur melayang atau nonterrestrial, kebutuhan adaptif menjadi lebih kompleks karena menghadapi variabel atmosfer, keterbatasan energi, dan tuntutan

stabilitas tinggi. Desain harus ringan, modular, dan mampu mengatur keseimbangan serta distribusi beban secara presisi. Integrasi energi terbarukan dan sistem pemantauan digital memperkuat kemampuan respons terhadap perubahan lingkungan.

Secara konseptual, arsitektur adaptif menandai pergeseran dari fokus pada bentuk menuju performa. Keberhasilan desain diukur dari kemampuannya berfungsi optimal dalam kondisi berubah, menjadikan arsitektur sebagai infrastruktur hidup yang responsif, resilien, dan berkelanjutan.

2.4.3 Konsep Arsitektur Pasca Tanah

Arsitektur pasca tanah merujuk pada pendekatan perancangan yang tidak sepenuhnya bergantung pada tanah sebagai elemen struktural, spasial, maupun simbolik utama. Jika arsitektur konvensional selalu berangkat dari logika fondasi gravitasi, tapak, dan keterikatan permanen pada permukaan bumi maka arsitektur nonterrestrial justru mempertanyakan asumsi tersebut. Ia membuka kemungkinan bahwa ruang dapat dibentuk, dihuni, dan dioperasikan tanpa ketergantungan absolut pada tanah sebagai satu-satunya medium eksistensi arsitektur.

Reyner Banham (1969) melalui konsep *welltempered environment* menekankan bahwa arsitektur modern semakin ditentukan oleh sistem lingkungan buatan seperti teknologi mekanikal, sistem energi, dan kontrol iklim dibandingkan oleh elemen struktural konvensional semata. Banham menunjukkan bahwa kenyamanan dan kelayakan huni tidak lagi semata-mata dihasilkan oleh dinding tebal atau massa bangunan, melainkan oleh sistem pengatur lingkungan yang canggih. Dalam kerangka ini, bangunan dipahami sebagai perangkat lingkungan (*environmental apparatus*), di mana teknologi memiliki peran sentral dalam membentuk kualitas ruang.

Pemikiran tersebut secara implisit menggeser posisi tanah sebagai penentu utama arsitektur. Jika performa ruang dapat dikontrol melalui sistem buatan ventilasi mekanis, pendingin udara, struktur ringan, dan sistem energi mandiri maka arsitektur tidak lagi harus sepenuhnya ditentukan oleh kondisi tapak. Tanah menjadi salah satu variabel, bukan fondasi absolut. Dengan demikian, konsep pasca tanah berkembang sebagai kelanjutan logis dari arsitektur yang semakin terintegrasi dengan teknologi.

Pendekatan pasca tanah membuka kemungkinan arsitektur untuk beroperasi di berbagai medium selain daratan, seperti udara, air, bahkan ruang angkasa. Dalam konteks ini, arsitektur dipahami sebagai sistem yang mampu menciptakan kondisi huni di lingkungan yang secara alami tidak mendukung kehidupan manusia. Contohnya meliputi platform terapung di atas laut, struktur udara berbasis balon atau aerostat, hingga habitat modular di lingkungan ekstrem. Medium menjadi variabel desain yang dapat dinegosiasikan melalui inovasi struktur dan teknologi.

Secara struktural, arsitektur pasca tanah menuntut pemikiran ulang terhadap beban, stabilitas, dan distribusi gaya. Jika arsitektur darat bertumpu pada sistem fondasi dan transfer beban ke tanah, maka arsitektur udara atau terapung harus mengelola gaya angkat, keseimbangan, tekanan, dan dinamika fluida. Prinsip aerodinamika, hidrodinamika, serta material ringan berperforma tinggi menjadi elemen penting dalam perancangan. Dengan demikian, batas antara arsitektur dan rekayasa teknik menjadi semakin tipis.

Secara spasial, arsitektur pasca tanah juga mengubah cara ruang diorganisasi. Ketika tidak lagi terikat pada batas tapak konvensional, konfigurasi ruang dapat dirancang lebih fleksibel dan modular. Ruang dapat disusun secara vertikal, radial, atau terdistribusi dalam jaringan yang bergerak. Mobilitas menjadi bagian dari strategi spasial, bukan sekadar tambahan fungsional. Dalam konteks ini, arsitektur bukan hanya tempat, tetapi sistem yang dapat berpindah dan bertransformasi.

Dalam situasi krisis iklim dan keterbatasan lahan, konsep pasca tanah memperoleh relevansi baru. Kenaikan muka air laut, kepadatan urban, serta kerusakan infrastruktur darat mendorong eksplorasi alternatif ruang yang tidak sepenuhnya bergantung pada tanah. Arsitektur melayang dapat dipahami sebagai respon terhadap kondisi geografis dan ekologis yang tidak memungkinkan pembangunan konvensional. Ia menawarkan kemungkinan untuk menghadirkan infrastruktur, hunian, atau fasilitas produksi di wilayah yang sulit dijangkau atau rentan bencana.

Lebih jauh, arsitektur pasca tanah juga merefleksikan pergeseran paradigma dari arsitektur berbasis lokasi menuju arsitektur berbasis sistem. Keberlanjutan tidak hanya ditentukan oleh efisiensi energi atau material, tetapi oleh kemampuan sistem untuk beroperasi secara mandiri, adaptif, dan terintegrasi dengan jaringan yang lebih luas.

Bangunan menjadi bagian dari ekosistem teknologi dan logistik yang melampaui batas fisik tapak.

Dengan demikian, konsep arsitektur pasca tanah bukan sekadar eksplorasi bentuk futuristik, melainkan kerangka teoretis yang menempatkan arsitektur sebagai sistem lingkungan buatan yang otonom dan fleksibel. Ia menjadi landasan konseptual bagi pengembangan arsitektur melayang sebagai respon terhadap keterbatasan lahan, tantangan geografis, serta kebutuhan kemanusiaan yang memerlukan solusi spasial di luar paradigma pembangunan darat konvensional.

2.4.4 Arsitektur Melayang sebagai Evolusi Arsitektur

Arsitektur melayang dapat dipahami sebagai tahap evolusi arsitektur yang muncul dari kebutuhan untuk merespons tantangan ruang dan lingkungan kontemporer yang semakin kompleks. Jika arsitektur tradisional berkembang dari logika perlindungan dan keterikatan pada tanah, maka arsitektur modern memperluas cakrawala melalui teknologi struktur dan material. Pada fase berikutnya, arsitektur melayang hadir sebagai bentuk transformasi yang lebih radikal melepaskan ketergantungan absolut terhadap tanah dan mengeksplorasi ruang udara sebagai medium spasial baru.

Peter Cook (1970), melalui gagasan *experimental architecture*, menempatkan arsitektur sebagai medan eksplorasi ide, teknologi, dan imajinasi. Dalam pemikirannya, arsitektur tidak harus tunduk pada konvensi struktural tradisional yang kaku, tetapi dapat berevolusi melalui eksperimen terhadap mobilitas, modularitas, dan integrasi sistem mekanis. Proyekproyek spekulatif seperti kota berjalan (*Walking City*) atau sistem plugin menunjukkan bahwa bangunan dapat dipahami sebagai entitas dinamis bergerak, berubah, dan terhubung dalam jaringan yang fleksibel. Gagasan ini membuka landasan konseptual bagi kemungkinan arsitektur yang tidak lagi berpijak secara permanen pada tanah.

Dalam konteks evolusi tersebut, konsep melayang bukan sekadar fantasi utopis, melainkan respons kritis terhadap kondisi nyata abad ke-21. Kepadatan perkotaan yang ekstrem, keterbatasan lahan produktif, kenaikan muka air laut, serta meningkatnya frekuensi bencana akibat perubahan iklim menuntut pendekatan spasial yang lebih adaptif dan inovatif. Infrastruktur darat sering kali rentan terhadap kerusakan atau tidak mampu

menjangkau wilayah terpencil. Arsitektur melayang menawarkan alternatif dengan memanfaatkan ruang udara sebagai domain baru untuk distribusi, hunian, maupun produksi.

Secara konseptual, arsitektur melayang merepresentasikan pergeseran dari paradigma statis menuju paradigma mobilitas. Bangunan tidak lagi harus bersifat tetap dan permanen, tetapi dapat dirancang untuk berpindah mengikuti kebutuhan, mendekati lokasi krisis, atau menghindari risiko lingkungan tertentu. Dalam konteks kemanusiaan, kemampuan untuk menjangkau wilayah terisolasi tanpa bergantung pada infrastruktur darat menjadi nilai strategis yang signifikan. Ruang tidak lagi ditentukan oleh batas geografis, melainkan oleh kapasitas sistem untuk bergerak dan beradaptasi.

Evolusi ini juga berkaitan dengan kemajuan teknologi material ringan, sistem aerodinamika, energi terbarukan, dan kontrol digital. Tanpa dukungan inovasi tersebut, gagasan arsitektur melayang akan tetap berada pada ranah spekulatif. Namun, perkembangan teknologi kontemporer memungkinkan integrasi struktur ringan berdaya angkat, sistem stabilisasi otomatis, serta manajemen energi mandiri. Dengan demikian, arsitektur melayang bukan sekadar eksplorasi bentuk, tetapi sistem teknis yang kompleks dan terukur.

Dari sisi ekologis, arsitektur melayang memiliki potensi untuk meminimalkan intervensi terhadap tapak. Karena tidak memerlukan fondasi konvensional yang masif, ia dapat mengurangi kerusakan tanah, deforestasi, atau perubahan kontur alam. Pendekatan ini selaras dengan prinsip keberlanjutan yang menekankan minimnya jejak ekologis (*ecological footprint*). Arsitektur menjadi lebih ringan secara fisik sekaligus lebih fleksibel secara operasional.

Jika arsitektur adaptif menekankan kemampuan merespons perubahan, dan arsitektur mobile menekankan pergerakan, maka arsitektur melayang dapat dipandang sebagai sintesis keduanya. Ia menggabungkan fleksibilitas spasial, responsivitas terhadap lingkungan, serta kemampuan berpindah medium. Dalam kerangka evolusi arsitektur, tahap ini mencerminkan upaya manusia untuk memperluas domain huni melampaui batas terestrial tanpa sepenuhnya meninggalkan bumi.

Dengan demikian, arsitektur melayang dapat dipahami sebagai kelanjutan logis dari perkembangan arsitektur eksperimental, adaptif, dan mobile. Ia bukan sekadar simbol futuristik, melainkan respon terhadap realitas global yang menuntut solusi ruang yang lebih dinamis, resilien, dan mampu beroperasi dalam kondisi yang tidak lagi dapat sepenuhnya diakomodasi oleh paradigma pembangunan darat konvensional.

2.4.5 Karakteristik Arsitektur Udara

Arsitektur udara merupakan pendekatan perancangan yang beroperasi di medium atmosfer tanpa bertumpu langsung pada tanah sebagai sistem penopang utama. Perbedaan medium ini menghasilkan karakter struktural dan operasional yang mendasar: jika arsitektur terestrial mengandalkan fondasi dan massa untuk stabilitas, maka arsitektur udara bergantung pada keseimbangan, daya angkat, efisiensi berat, dan pengelolaan energi secara presisi.

Salah satu karakter utamanya adalah mobilitas. Modul ruang dapat berpindah lokasi sesuai kebutuhan operasional menjangkau wilayah tertentu, menghindari risiko lingkungan, atau mengikuti distribusi logistik. Dalam konteks krisis, kemampuan bergerak cepat menuju area terdampak menjadi keunggulan dibanding infrastruktur statis. Mobilitas ini didukung oleh struktur ringan dan efisien, menggunakan material berperforma tinggi seperti komposit atau membran struktural, dengan perhatian khusus pada pusat gravitasi, distribusi beban, dan respons terhadap tekanan angin.

Modularitas juga menjadi prinsip penting. Unit ruang dirancang agar dapat dirakit, dilepas, dan dikonfigurasi ulang baik sebagai modul produksi, penyimpanan, maupun hunian sehingga fleksibel terhadap perubahan skala dan fungsi. Integrasi teknologi mempertegas karakter ini. Seperti dijelaskan oleh David G. Scott (2008), dalam arsitektur berbasis teknologi batas antara bangunan dan mesin menjadi kabur. Pada arsitektur udara, struktur, sistem energi, kontrol lingkungan, dan stabilisasi posisi menyatu dalam satu kesatuan performatif.

Efisiensi energi menjadi krusial karena sistem tidak selalu terhubung dengan jaringan utilitas darat. Optimalisasi aerodinamika, pengurangan hambatan angin, serta pemanfaatan energi terbarukan seperti panel surya atau turbin angin ringan merupakan bagian dari strategi desain. Selain itu, responsivitas terhadap dinamika atmosfer perubahan angin, tekanan, dan

suhu menuntut integrasi sensor dan sistem kendali otomatis untuk menjaga stabilitas dan keamanan secara realtime.

Dengan karakter mobilitas, struktur ringan, modularitas, integrasi teknologi, efisiensi energi, dan responsivitas lingkungan, arsitektur udara menawarkan pendekatan yang relevan bagi infrastruktur kemanusiaan. Ia bukan sekadar eksplorasi futuristik, melainkan strategi spasial yang memungkinkan sistem beroperasi secara independen, adaptif, dan tangguh dalam kondisi ekstrem maupun wilayah yang sulit dijangkau.

2.4.6 Domain Udara sebagai Ruang Arsitektural

Domain udara dapat dipahami sebagai ruang arsitektural ketika ia tidak lagi dilihat sebagai ruang kosong, melainkan sebagai medium operasional yang memiliki struktur, regulasi, dan batas performatif. Dalam kajian penerbangan, ruang udara diklasifikasikan, diatur, dan dikontrol melalui sistem navigasi serta protokol keselamatan yang ketat (FAA, 2016). Artinya, udara memiliki hierarki, zonasi, dan kontrol akses karakteristik yang secara konseptual serupa dengan tata ruang pada lingkungan terbangun. Dengan demikian, udara bukan sekadar latar belakang aktivitas, tetapi ruang yang diproduksi oleh teknologi, hukum fisika, dan regulasi.

Sebagai medium operasional, udara memungkinkan aktivitas berlangsung tanpa ketergantungan pada fondasi terestrial. Stabilitas dalam ruang ini ditentukan oleh keseimbangan gaya aerodinamika lift, weight, thrust, dan drag sebagaimana dijelaskan oleh John D. Anderson Jr. (2010). Ruang arsitektural di udara tidak dibentuk oleh elemen struktural konvensional seperti pondasi dan kolom, melainkan oleh performa sistem yang menjaga posisi, orientasi, dan keseimbangan. Oleh karena itu, arsitektur udara menempatkan teknologi sebagai pengganti tapak fisik.

Dalam perspektif spasial, domain udara juga merepresentasikan *nonterritorial space*. Berbeda dengan ruang darat yang terikat pada batas geografis tetap, ruang udara bersifat dinamis dan ditentukan oleh lintasan, ketinggian, serta durasi operasi. Namun demikian, ia tetap berada dalam kerangka kedaulatan negara. Konvensi internasional seperti International Civil Aviation Organization (ICAO, 1944) menegaskan bahwa setiap negara memiliki kedaulatan penuh atas ruang udara di atas wilayahnya. Dengan demikian, ruang udara

bersifat nonteritorial secara fisik, tetapi tetap memiliki dimensi hukum dan politik yang jelas.

Konsep ruang tanpa tapak permanen menjadi karakter utama domain udara. Platform melayang, drone logistik, atau modul terbang tidak memiliki lokasi tetap; eksistensinya bergantung pada koordinat, waktu, dan sistem kontrol. Ruang dihasilkan selama operasi berlangsung dan dapat berpindah ketika fungsi selesai. Hal ini memperluas definisi “tapak” dalam arsitektur dari bidang tanah yang statis menjadi koordinat dinamis dalam jaringan spasial vertikal.

Dengan demikian, domain udara memperluas pemahaman arsitektur dari praktik berbasis tanah menuju praktik berbasis sistem dan mobilitas. Tapak tidak lagi dipahami semata sebagai lokasi geografis, melainkan sebagai kondisi operasional yang memungkinkan ruang berfungsi. Perspektif ini membuka kemungkinan redefinisi arsitektur sebagai praktik yang mampu beroperasi dalam medium nonterrestrial, di mana performa teknologi, regulasi udara, dan dinamika atmosfer menjadi fondasi baru bagi produksi ruang.

2.5 Teknologi Transportasi Udara sebagai Infrastruktur Ruang

2.5.1 Teori Infrastruktur sebagai Ruang

Teori infrastruktur sebagai ruang memandang infrastruktur bukan sekadar sistem teknis utilitarian, melainkan entitas spasial yang membentuk pengalaman, pergerakan, dan relasi sosial. Jalan, pelabuhan, bandara, jaringan logistik, hingga sistem digital dipahami sebagai struktur yang mengorganisasi kehidupan sehari-hari. Infrastruktur tidak lagi berada “di belakang layar”, tetapi menjadi bagian integral dari produksi ruang itu sendiri.

Keller Easterling melalui konsep *extrastatecraft* (2014) menjelaskan bahwa infrastruktur bekerja secara laten melalui protokol, standar, dan jaringan yang mengatur mobilitas serta distribusi global. Ia memiliki dimensi politis karena menentukan konektivitas, akses, dan hierarki antarwilayah. Dalam kerangka ini, ruang tidak hanya dibentuk oleh batas fisik bangunan, tetapi oleh sistem konektivitas koridor logistik, jalur penerbangan, jaringan energi, dan node distribusi yang membentuk lanskap global kontemporer.

Jika diterapkan pada konteks udara, maka ruang atmosfer dapat dipahami sebagai medium infrastruktur. Jalur penerbangan, zona navigasi, dan sistem kontrol lalu lintas udara membentuk struktur spasial tersendiri yang terorganisasi dan teregulasi. Ruang udara bukan ruang kosong, melainkan ruang operasional yang diproduksi oleh lintasan, koordinasi, dan komunikasi sistemik. Pesawat kargo, drone logistik, atau platform udara menjadi ruang bergerak yang menghubungkan node produksi dan distribusi dalam jaringan dinamis.

Pendekatan ini menggeser fokus arsitektur dari objek bangunan menuju sistem yang memungkinkan konektivitas dan fungsi. Infrastruktur memiliki kualitas spasial ritme, hierarki, aksesibilitas, intensitas yang dapat dirancang dan dianalisis secara arsitektural. Dalam konteks kemanusiaan, pemahaman ini krusial: ketika akses darat terputus, infrastruktur udara membentuk koridor distribusi dan node sementara yang menentukan efektivitas respons krisis.

Dengan demikian, teori infrastruktur sebagai ruang memperluas pemahaman terhadap sistem udara sebagai struktur spasial yang aktif membentuk pergerakan dan relasi distribusi. Perspektif ini memperkuat posisi arsitektur udara dan infrastruktur kemanusiaan sebagai medan desain strategis yang layak dikembangkan melalui pendekatan arsitektural yang komprehensif.

2.5.2 Teori Mobilitas dan Teknologi Ruang

Teori mobilitas menempatkan pergerakan sebagai elemen fundamental pembentuk ruang kontemporer. Ruang tidak lagi dipahami sebagai wadah statis, melainkan sebagai hasil dari aliran manusia, barang, informasi, energi, dan modal yang bergerak melalui jaringan. Mobilitas membentuk hierarki akses, ritme sosioekonomi, serta struktur spasial yang ditentukan oleh kecepatan, frekuensi, dan arah pergerakan.

Dalam konteks globalisasi dan teknologi, lanskap mobilitas bandara, pelabuhan, rel, jalan tol, hingga jaringan digital menciptakan *networked space* di mana konektivitas lebih menentukan dibanding kedekatan geografis. Titik yang berjauhan dapat menjadi dekat secara fungsional karena terhubung oleh sistem transportasi dan komunikasi yang efisien. Ruang pun menjadi temporal dan dinamis, diproduksi terusmenerus oleh arus yang melintasinya.

Transportasi udara memperluas konsep ini dengan menghadirkan dimensi vertikal sebagai medan operasional. Ruang udara terstruktur oleh jalur penerbangan, zona navigasi, dan sistem kontrol lalu lintas, membentuk lapisan spasial yang berbeda dari logika horizontal darat. Menurut John D. Anderson Jr. (2010), penerbangan bergantung pada keseimbangan empat gaya: lift, weight, thrust, dan drag. Interaksi gayagaya ini menentukan stabilitas dan kapasitas angkut, sekaligus menunjukkan bahwa ruang udara dibentuk oleh performa teknologi dan hukum fisika, bukan oleh fondasi konvensional.

Karena itu, ruang udara bukan ruang kosong, melainkan ruang yang diatur oleh regulasi, protokol navigasi, dan sistem kendali digital. Ia memiliki batas dan hierarki yang menentukan siapa dapat bergerak dan bagaimana pergerakan berlangsung. Dalam arsitektur nonterrestrial, struktur melayang harus merespons keseimbangan gaya, efisiensi aerodinamika, serta kontrol presisi, sehingga ruang dibentuk oleh interaksi sistem dan atmosfer.

Lebih jauh, teori mobilitas menekankan sifat sementara dan adaptif ruang berbasis teknologi. Platform udara atau modul bergerak menciptakan ruang operasional yang hadir selama durasi tertentu dan dapat berpindah setelah fungsi selesai. Ruang menjadi fenomena berbasis waktu dan kinerja, bukan permanensi. Perspektif ini memperkuat legitimasi arsitektur udara sebagai evolusi ruang kontemporer yang dinamis, terhubung, dan berbasis mobilitas.

2.5.3 Transportasi Udara dalam Sistem Kemanusiaan

Dalam sistem kemanusiaan, transportasi udara berperan strategis sebagai instrumen respons cepat pada fase tanggap darurat terutama dalam 24–72 jam pertama setelah bencana ketika kecepatan distribusi menentukan keselamatan jiwa. Saat infrastruktur darat rusak akibat gempa, banjir, konflik, atau longsor, moda udara sering menjadi satu-satunya jalur yang dapat menjangkau wilayah terdampak, termasuk daerah terpencil, kepulauan, pegunungan, dan zona berisiko tinggi.

Menurut Federal Aviation Administration (2016), helikopter dan pesawat angkut dirancang untuk beroperasi pada kondisi medan terbatas, termasuk landasan pendek atau pendaratan vertikal tanpa infrastruktur permanen. Kapabilitas ini menjadikan transportasi udara efektif untuk evakuasi medis, pengiriman logistik darurat, serta mobilisasi tim

penyelamat. Selain sebagai alat angkut, moda udara juga berfungsi sebagai platform multifungsi: ambulans udara untuk pemindahan korban, pesawat kargo untuk suplai kebutuhan dasar, hingga sarana pemetaan dan pemantauan wilayah terdampak secara realtime.

Dalam kerangka yang lebih luas, ruang udara membentuk koridor distribusi vertikal yang melengkapi jaringan darat dan laut. Jalur penerbangan, titik pendaratan sementara, dan pusat koordinasi menjadi node dalam sistem logistik kemanusiaan global. Namun demikian, moda ini menghadapi keterbatasan kapasitas, biaya operasional tinggi, serta ketergantungan pada cuaca dan regulasi wilayah udara. Karena itu, efektivitasnya sangat bergantung pada koordinasi lintas lembaga dan integrasi dalam sistem multimoda.

Dengan demikian, transportasi udara tidak sekadar teknologi penerbangan, melainkan komponen infrastruktur strategis yang menciptakan ruang respons cepat dalam kondisi ekstrem. Dalam konteks arsitektur dan infrastruktur pasca tanah, ia membuka peluang pengembangan platform melayang yang tidak hanya mengangkut bantuan, tetapi juga menjadi bagian aktif dari sistem ruang kemanusiaan yang adaptif, terintegrasi, dan resilien.

2.5.4 Helikopter Angkut Berat dan Kapasitas Ruang

Helikopter angkut berat merupakan teknologi kunci dalam sistem transportasi udara kemanusiaan, terutama pada fase tanggap darurat yang membutuhkan pengiriman logistik besar ke wilayah dengan akses terbatas. Berbeda dari pesawat sayap tetap, helikopter memiliki kemampuan *vertical takeoff and landing* (VTOL) sehingga dapat beroperasi di area sempit, medan kasar, atau tanpa landasan permanen. Kapabilitas ini menjadikannya instrumen strategis untuk evakuasi, distribusi bantuan, dan mobilisasi peralatan berat.

Secara aerodinamika, kapasitas angkut helikopter ditentukan oleh keseimbangan empat gaya utama lift, weight, thrust, dan drag sebagaimana dijelaskan oleh John D. Anderson Jr. (2010). Gaya angkat dari rotasi balingbaling harus mengimbangi berat total sistem, termasuk struktur, bahan bakar, awak, dan muatan. Efisiensi sistem tenaga serta struktur yang ringan menjadi faktor penentu dalam memaksimalkan proporsi muatan. Karena itu, kapasitas tidak hanya bergantung pada volume kabin, tetapi juga pada distribusi beban dan pusat gravitasi untuk menjaga stabilitas penerbangan.

Dalam perspektif arsitektural, helikopter angkut berat dapat dipahami sebagai ruang bergerak dengan parameter performatif yang ketat. Kabinnya berfungsi sebagai ruang evakuasi medis, penyimpanan logistik, atau titik distribusi udara (*airdrop*), namun selalu dibatasi oleh *maximum takeoff weight*, dimensi muatan, dan konfigurasi internal. Konsekuensinya, modul bantuan seperti unit medis portabel, sistem filtrasi air, atau paket pangan harus dirancang ringan, kompak, dan modular agar selaras dengan logika aeronautika.

Penggunaan sistem *sling load* memperluas konsep ruang ini. Muatan eksternal yang digantung di bawah badan helikopter memungkinkan pengangkutan kendaraan ringan, generator, atau modul struktur sementara. Dengan demikian, kapasitas ruang tidak hanya terbatas pada interior kabin, tetapi juga mencakup ruang eksternal yang dikontrol secara aerodinamis.

Dalam sistem infrastruktur kemanusiaan, helikopter angkut berat berfungsi sebagai *node* bergerak yang menghubungkan depot pusat dengan titik distribusi akhir, terutama ketika moda darat tidak dapat beroperasi. Ia terintegrasi dalam jaringan multimoda, namun dalam kondisi ekstrem sering menjadi satu-satunya jalur yang menjaga kesinambungan distribusi. Oleh karena itu, integrasi prinsip aeronautika dan pendekatan arsitektural menjadi penting untuk merancang sistem ruang berbasis udara yang adaptif, modular, dan efektif dalam mendukung operasi kemanusiaan.

2.5.5 Sistem Logistik Udara dan Distribusi Modular

Sistem logistik udara (*airborne logistics*) merupakan komponen penting dalam respons kemanusiaan modern, terutama ketika infrastruktur darat terganggu atau tidak dapat diakses. Dalam fase tanggap darurat, moda udara memungkinkan distribusi cepat ke wilayah terpencil, terisolasi, atau terdampak konflik. Organisasi seperti World Food Programme melalui layanan *Humanitarian Air Service* menunjukkan bahwa koridor udara berfungsi sebagai penghubung vital antara pusat logistik regional dan titik distribusi akhir, terutama dalam 72 jam pertama pascabencana (WFP, 2020). Moda ini memperkuat prinsip kecepatan (*speed*) dan jangkauan (*reach*) dalam manajemen rantai pasok kemanusiaan.

Perkembangan *drone delivery* memperluas kapasitas distribusi udara dalam skala taktis. Studi oleh UNICEF (2019) menunjukkan bahwa penggunaan UAV (unmanned aerial

vehicles) efektif untuk distribusi medis di wilayah terpencil dengan waktu pengiriman lebih singkat dibanding transportasi darat. Secara operasional, drone memungkinkan pengiriman presisi (*lastmile delivery*) dengan biaya relatif lebih rendah untuk muatan kecil dan kebutuhan mendesak, meskipun masih memiliki keterbatasan kapasitas angkut dan durasi terbang.

Konsep *modular payload system* menjadi strategi desain yang meningkatkan efisiensi logistik udara. Menurut Sheffi (2005) dalam kajian manajemen rantai pasok, modularitas meningkatkan fleksibilitas dan mempercepat proses konsolidasi serta redistribusi muatan. Dalam konteks penerbangan, muatan modular memungkinkan penyesuaian cepat terhadap parameter teknis seperti *maximum takeoff weight*, pusat gravitasi, dan konfigurasi kabin. Standarisasi unit muatan juga mempercepat proses bongkarmuat dan meminimalkan kesalahan distribusi.

Sistem *airdrop* merupakan metode distribusi tanpa pendaratan yang relevan dalam situasi ekstrem. Berdasarkan panduan teknis Federal Aviation Administration (2016), pelepasan muatan melalui sistem parasut atau *precision guided airdrop* memungkinkan distribusi bantuan ke area tanpa landasan atau zona aman. Teknologi ini memanfaatkan kalkulasi aerodinamika memperhitungkan kecepatan angin, ketinggian, dan berat muatan untuk memastikan akurasi pendaratan.

Secara analitis, domain udara dapat dipahami sebagai jalur distribusi alternatif yang membentuk ruang logistik vertikal. Ia bersifat dinamis dan bergantung pada regulasi navigasi, performa teknologi, serta koordinasi antarlembaga. Dalam kerangka sistem multimoda, logistik udara meningkatkan resiliensi jaringan distribusi dengan menyediakan redundansi ketika moda darat dan laut terganggu. Integrasi antara *airborne logistics*, *drone delivery*, sistem muatan modular, dan *airdrop* memperlihatkan bahwa ruang udara bukan sekadar medium transportasi, melainkan infrastruktur distribusi yang terstruktur secara teknis dan operasional.

2.5.6 Integrasi Transportasi Udara dengan Infrastruktur Darat

Integrasi antara transportasi udara dan infrastruktur darat membentuk jaringan distribusi yang bersifat multimodal. Rodrigue (2020) menjelaskan bahwa sistem transportasi

modern beroperasi sebagai jaringan node dan koridor yang saling terhubung, di mana efisiensi ditentukan oleh keterpaduan antar moda.

Dalam konteks kemanusiaan, integrasi ini memungkinkan transportasi udara berfungsi sebagai penghubung antara pusat logistik global dan node distribusi lokal di darat. Infrastruktur udara dan darat tidak berdiri sendiri, melainkan membentuk sistem ruang yang saling melengkapi. Pemahaman ini menjadi dasar bagi perancangan infrastruktur kemanusiaan yang memanfaatkan teknologi udara sebagai bagian dari jaringan distribusi yang berkelanjutan dan adaptif.

2.6 Desain Spekulatif sebagai Metode Perancangan

2.6.1 Teori Desain Spekulatif

Desain spekulatif merupakan pendekatan perancangan yang berorientasi pada eksplorasi kemungkinan masa depan melalui penciptaan objek, sistem, dan narasi hipotetik. Pendekatan ini dipopulerkan oleh Anthony Dunne dan Fiona Raby dalam *Speculative Everything* (2013). Mereka menegaskan bahwa tujuan utama desain spekulatif bukan menghasilkan solusi siap pakai, melainkan membuka ruang diskusi kritis mengenai konsekuensi sosial, politik, ekologis, dan etis dari pilihan desain di masa depan.

Dalam kerangka ini, desain berfungsi sebagai medium berpikir *design as critique* dan *design as projection*. Sebagai kritik, desain digunakan untuk mempertanyakan asumsi dominan dalam praktik konvensional, seperti ketergantungan pada pertumbuhan ekonomi tanpa batas, eksploitasi sumber daya, atau keyakinan bahwa teknologi selalu menjadi solusi tunggal. Sebagai proyeksi, desain membangun *plausible futures* skenario masa depan yang mungkin terjadi berdasarkan tren, data, dan isu aktual. Spekulasi di sini bukanlah fiksi bebas, melainkan eksplorasi rasional yang berakar pada realitas kontemporer.

Desain spekulatif sering menghadirkan objek atau sistem yang bersifat provokatif, hipotetik, bahkan utopis atau distopis, namun tetap koheren secara logis. Melalui konstruksi dunia alternatif (*alternative world construction*), pendekatan ini memungkinkan perancang menguji batas kemungkinan dan mengantisipasi kondisi yang belum sepenuhnya terjadi. Representasi dapat berupa model konseptual, prototipe eksperimental, visualisasi, atau narasi desain yang memicu refleksi publik.

Pendekatan ini relevan dalam menghadapi kondisi ekstrem dan krisis global perubahan iklim, konflik geopolitik, krisis pangan, hingga transformasi teknologi radikal. Dengan mensimulasikan skenario masa depan, desain spekulatif membantu mengevaluasi implikasi etis dan sistemik sebelum realitas tersebut terwujud. Dalam konteks arsitektur, hal ini membuka peluang untuk merancang tipologi baru seperti arsitektur nonterestrial, infrastruktur bergerak, atau sistem pendukung kehidupan dalam lingkungan ekstrem konfigurasi yang belum memiliki preseden langsung tetapi berakar pada kebutuhan nyata.

Meskipun bersifat imajinatif, desain spekulatif tetap berbasis riset. Ia menjaga keseimbangan antara imajinasi dan rasionalitas, antara kemungkinan dan realitas. Secara konseptual, pendekatan ini memperluas peran arsitek dan perancang sebagai agen reflektif yang tidak hanya merespons kebutuhan kini, tetapi juga membentuk wacana tentang masa depan. Dalam menghadapi krisis global yang kompleks, desain spekulatif menyediakan kerangka untuk mengeksplorasi sistem arsitektural yang melampaui batas konvensional sekaligus tetap relevan terhadap tantangan nyata masyarakat.

2.6.2 Desain Spekulatif dalam Arsitektur

Dalam ranah arsitektur, desain spekulatif berfungsi sebagai metode kritik sekaligus alat antisipasi terhadap masa depan lingkungan binaan. Pendekatan ini tidak hanya berupaya memproyeksikan bentuk arsitektur masa depan, tetapi juga mengeksplorasi sistem, relasi sosial, dan konsekuensi yang mungkin muncul dari perkembangan teknologi serta dinamika global. Sterling (2009) melalui konsep *design fiction* menempatkan desain sebagai medium naratif yang mampu mensimulasikan bagaimana teknologi dan sistem sosial beroperasi dalam kehidupan sehari-hari. Dalam konteks ini, arsitektur menjadi perangkat pencerita yang memvisualisasikan skenario masa depan secara konkret dan terbayangkan.

Arsitektur spekulatif tidak berhenti pada representasi estetis atau formal, melainkan menguji implikasi etis, ekologis, dan kemanusiaan dari suatu kemungkinan desain. Setiap skenario yang dibangun mengandung pertanyaan kritis: siapa yang diuntungkan, siapa yang terdampak, bagaimana sumber daya dikelola, dan bagaimana sistem tersebut memengaruhi relasi manusia dengan lingkungannya. Dengan demikian, desain menjadi instrumen refleksi terhadap arah perkembangan peradaban dan teknologi.

Pendekatan spekulatif juga memungkinkan arsitektur merespons krisis yang kompleks dan belum memiliki preseden langsung, seperti krisis iklim global, migrasi massal akibat bencana, konflik geopolitik, atau kelangkaan sumber daya. Dalam situasi di mana solusi konvensional tidak lagi memadai, spekulasi membuka ruang eksplorasi terhadap tipologi dan sistem baru. Arsitektur dapat dibayangkan sebagai infrastruktur adaptif, modular, atau bahkan bergerak lintas medium darat, laut, dan udara.

Dalam konteks infrastruktur kemanusiaan, desain spekulatif berperan untuk membayangkan sistem arsitektural yang mampu beroperasi dalam kondisi ekstrem dan ketidakpastian tinggi. Melalui skenario desain, arsitektur dapat diproyeksikan sebagai unit mandiri yang mengintegrasikan energi, air, pangan, dan sistem logistik dalam satu kesatuan metabolik. Spekulasi di sini bukan sekadar imajinasi futuristik, melainkan eksplorasi rasional berbasis isu nyata yang terus berkembang.

Lebih jauh, pendekatan ini juga memungkinkan perancang untuk menguji batas antara arsitektur dan teknologi, antara ruang fisik dan sistem jaringan. Konsep arsitektur nonterrestrial, infrastruktur melayang, atau platform kemanusiaan bergerak menjadi medan eksperimentasi yang memperluas definisi ruang dan fungsi bangunan. Arsitektur tidak lagi terikat pada tapak tetap, tetapi menjadi sistem yang dapat beradaptasi terhadap perubahan lingkungan dan kebutuhan manusia.

Dengan demikian, desain spekulatif dalam arsitektur merupakan pendekatan metodologis yang menggabungkan imajinasi, kritik, dan proyeksi masa depan. Ia membuka kemungkinan pengembangan konsep arsitektur yang melampaui batas konvensional, sekaligus tetap berakar pada persoalan nyata seperti krisis iklim, ketahanan pangan, dan kebutuhan infrastruktur kemanusiaan. Melalui spekulasi yang terstruktur dan reflektif, arsitektur dapat berperan aktif dalam membentuk visi masa depan yang lebih adaptif dan berkelanjutan.

2.6.3 Worldbuilding dalam Arsitektur

Worldbuilding dalam arsitektur merupakan pendekatan konseptual yang berfokus pada konstruksi sistem dunia secara menyeluruh melalui skenario, narasi masa depan, dan kerangka logika yang koheren. Berbeda dari sekadar penciptaan estetika futuristik, worldbuilding menekankan pembentukan struktur relasional antara lingkungan fisik, sistem

sosial, teknologi, ekologi, dan politik dalam suatu konfigurasi yang utuh dan konsisten. Pendekatan ini banyak dikembangkan dalam diskursus desain spekulatif oleh Anthony Dunne dan Fiona Raby melalui gagasan bahwa desain dapat membangun “dunia alternatif” yang memiliki aturan internal, logika operasional, serta implikasi etis dan sosial yang dapat diperdebatkan (Dunne & Raby, 2013).

Dalam praktiknya, worldbuilding melibatkan scenario building, yaitu penyusunan kondisi masa depan berdasarkan tren nyata seperti perubahan iklim, transformasi energi, atau krisis geopolitik. Skenario tersebut kemudian dikembangkan menjadi future narrative construction, yakni perumusan narasi yang menjelaskan bagaimana manusia hidup, berinteraksi, dan membentuk ruang dalam kondisi tersebut. Namun, yang paling fundamental adalah pembentukan system logic seperangkat aturan internal yang menjelaskan bagaimana energi diproduksi, bagaimana sumber daya didistribusikan, bagaimana struktur sosial bekerja, dan bagaimana ruang dibentuk oleh sistem tersebut. Tanpa logika sistemik yang konsisten, worldbuilding akan jatuh pada spekulasi visual semata.

Kerangka ini diperkuat oleh konsep plausibility framework, yaitu batas rasional yang menjaga agar dunia yang dibangun tetap memiliki kemungkinan terjadi berdasarkan data, tren, dan kondisi aktual. Dalam arsitektur, plausibilitas dicapai melalui integrasi riset teknis, ekologis, dan sosial, sehingga dunia yang dirancang bukan sekadar imajinasi, melainkan proyeksi kritis yang dapat diuji secara konseptual. Dengan demikian, worldbuilding berfungsi sebagai alat epistemologis cara untuk berpikir melalui desain bukan hanya sebagai teknik representasi.

Dalam konteks arsitektur kontemporer, worldbuilding memungkinkan perancangan tipologi baru seperti infrastruktur bergerak, sistem metabolisme tertutup, atau ruang nonterrestrial, yang tidak hanya berbeda secara bentuk, tetapi juga secara ontologis yakni mendefinisikan ulang relasi antara manusia, lingkungan, dan teknologi. Pendekatan ini memperluas peran arsitek dari perancang objek menjadi perancang sistem dunia, di mana ruang dipahami sebagai bagian dari jaringan logika yang lebih besar dan saling bergantung.

2.7 Prinsip Fisika Penerbangan dalam Arsitektur NonTerrestrial (Pasca Tanah)

Arsitektur nonterrestrial dan arsitektur melayang tidak dapat dilepaskan dari prinsip-prinsip fisika penerbangan yang mengatur bagaimana suatu objek dapat bertahan, bergerak, dan stabil di udara. Berbeda dengan arsitektur konvensional yang bertumpu pada gaya tekan dan gravitasi, arsitektur udara harus beroperasi dalam sistem gaya yang dinamis, melibatkan interaksi antara massa, energi, dan aliran fluida. Oleh karena itu, pemahaman terhadap hukum fisika penerbangan menjadi kerangka rasional yang membatasi sekaligus membuka kemungkinan desain spekulatif.

2.7.1 Hukum Newton tentang Gerak dan Gaya Angkat

Hukum Newton tentang gerak merupakan dasar fundamental dalam memahami sistem penerbangan. Newton (1687) melalui tiga hukum geraknya menjelaskan bahwa setiap benda akan mempertahankan keadaannya, mengalami percepatan akibat gaya yang bekerja padanya, serta menghasilkan gaya reaksi yang sama besar dan berlawanan arah.

Dalam konteks penerbangan, prinsip aksi reaksi pada Hukum III Newton menjadi dasar terbentuknya gaya angkat dan gaya dorong. Anderson (2010) menjelaskan bahwa ketika udara didorong ke bawah oleh sayap atau rotor, sistem udara menghasilkan gaya reaksi ke atas yang memungkinkan objek terangkat. Relevansi hukum Newton dalam arsitektur nonterrestrial terletak pada pemahaman bahwa struktur melayang tidak menghilangkan gravitasi, melainkan menyeimbangkannya melalui sistem gaya yang terkontrol. Dengan demikian, arsitektur udara beroperasi sebagai sistem fisika aktif, bukan sebagai objek pasif.

2.7.2 Prinsip Aerodinamika dan Gaya Angkat

Aerodinamika mempelajari perilaku aliran udara dan gaya yang dihasilkan ketika udara berinteraksi dengan objek. Gaya angkat (*lift force*) merupakan salah satu gaya utama dalam sistem penerbangan, selain gaya berat, gaya dorong, dan gaya hambat. Anderson (2001) menyatakan bahwa gaya angkat dipengaruhi oleh bentuk geometri, sudut serang, serta kecepatan aliran udara terhadap permukaan objek.

Dalam konteks arsitektur nonterrestrial, prinsip aerodinamika menentukan bagaimana bentuk dan konfigurasi ruang dapat memengaruhi stabilitas dan efisiensi sistem udara. Stabilitas objek di udara tidak hanya ditentukan oleh kekuatan mesin, tetapi juga oleh

kemampuan bentuk untuk mengelola aliran udara secara optimal. Oleh karena itu, aerodinamika menjadi parameter desain yang penting dalam merancang struktur melayang yang aman dan efisien.

2.7.3 Prinsip Bernoulli dan Aliran Fluida

Prinsip Bernoulli menjelaskan hubungan antara kecepatan aliran fluida dan tekanan yang dihasilkannya. Menurut prinsip ini, peningkatan kecepatan aliran fluida akan menurunkan tekanan, dan sebaliknya. Anderson (2001) serta panduan aerodinamika NASA menjelaskan bahwa perbedaan tekanan akibat variasi kecepatan aliran udara di atas dan di bawah permukaan sayap berkontribusi terhadap terbentuknya gaya angkat.

Dalam arsitektur udara, prinsip Bernoulli relevan untuk memahami bagaimana modul terbang, sayap, atau permukaan lengkung dapat menghasilkan perbedaan tekanan yang mendukung sistem melayang. Aliran fluida tidak hanya menjadi aspek teknis, tetapi juga memengaruhi bentuk dan organisasi ruang. Dengan demikian, desain arsitektur nonterrestrial harus mempertimbangkan perilaku fluida sebagai bagian dari sistem ruang yang aktif.

2.7.4 Mekanisme Gaya Angkat pada Sistem Bersayap dan Rotor

Sistem penerbangan dapat dibedakan berdasarkan mekanisme pembentukan gaya angkat, terutama pada sistem sayap tetap (*fixedwing*) dan sistem rotor. Anderson (2010) menjelaskan bahwa sistem sayap tetap menghasilkan gaya angkat melalui pergerakan maju yang menciptakan aliran udara kontinu di atas permukaan sayap. Sebaliknya, sistem rotor pada helikopter menghasilkan gaya angkat melalui rotasi bilah yang memaksa udara bergerak ke bawah secara langsung.

FAA (2016) menekankan bahwa perbedaan mekanisme ini memiliki implikasi signifikan terhadap stabilitas, kapasitas muatan, dan fleksibilitas operasional. Dalam konteks arsitektur nonterrestrial, pemahaman terhadap mekanisme ini penting untuk menentukan strategi desain ruang, modularitas, serta integrasi struktur dengan sistem penerbangan. Pilihan antara sistem bersayap dan rotor bukan hanya keputusan teknis, tetapi juga keputusan spasial dan arsitektural.

2.7.5 Kestabilan, Kontrol, dan Manuver di Udara

Kestabilan penerbangan merujuk pada kemampuan suatu sistem untuk mempertahankan atau kembali ke kondisi seimbang setelah mengalami gangguan. Etkin dan Reid (1996) membedakan kestabilan statis dan dinamis, yang keduanya dipengaruhi oleh distribusi massa, pusat gravitasi, dan konfigurasi struktur.

FAA (2016) menekankan bahwa sistem kontrol berfungsi untuk mengelola orientasi, arah, dan posisi di udara melalui mekanisme kendali yang terintegrasi. Dalam arsitektur udara, aspek kestabilan dan kontrol menjadi bagian dari desain ruang dan struktur, karena perubahan distribusi massa atau program ruang dapat memengaruhi performa penerbangan. Oleh karena itu, arsitektur nonterrestrial harus dirancang dengan mempertimbangkan keseimbangan antara fungsi ruang dan kestabilan sistem udara.

2.7.6 Termodinamika dalam Sistem Penerbangan dan Ruang Tertutup

Termodinamika mempelajari hubungan antara energi, panas, dan kerja dalam suatu sistem. Hukum Termodinamika I dan II menjelaskan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, serta bahwa setiap proses energi menghasilkan kehilangan dalam bentuk entropi. Moran dan Shapiro (2010) menekankan bahwa efisiensi sistem penerbangan sangat dipengaruhi oleh pengelolaan energi dan panas.

Dalam konteks arsitektur nonterrestrial, prinsip termodinamika berperan dalam pengelolaan ruang tertutup, sistem pendinginan, dan efisiensi energi. Atkins (2014) menjelaskan bahwa sistem tertutup yang tidak dikelola dengan baik akan mengalami penurunan performa akibat akumulasi panas dan kehilangan energi. Oleh karena itu, integrasi termodinamika dalam desain menjadi krusial untuk memastikan keberlanjutan dan kenyamanan ruang dalam infrastruktur terbang.

2.7.7 Batas Fisika sebagai Kerangka Desain Spekulatif

Fisika tidak hanya berfungsi sebagai batas teknis, tetapi juga sebagai kerangka rasional dalam desain spekulatif. Dunne dan Raby (2013) menekankan bahwa spekulasi yang bertanggung jawab harus tetap berakar pada hukum alam, sehingga menghasilkan visi masa depan yang kredibel. Sterling (2009) melalui *design fiction* menunjukkan bahwa spekulasi yang kuat justru lahir dari pemahaman mendalam terhadap batas kemungkinan teknologi dan sains.

Dalam konteks AERONOMED, prinsip fisika penerbangan berfungsi sebagai landasan untuk mengembangkan spekulasi arsitektural yang rasional. Arsitektur nonterrestrial diposisikan bukan sebagai utopia bebas hukum alam, melainkan sebagai eksplorasi desain yang beroperasi di dalam batas fisika yang dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

2.8 Sistem Teori Fisika dan Pendekatan Spekulatif

Sistem teori fisika dan pendekatan spekulatif digunakan sebagai kerangka konseptual dalam perancangan arsitektur nonterrestrial. Teori fisika, khususnya prinsip penerbangan dan termodinamika, berperan sebagai batas rasional yang menentukan kemungkinan struktural dan operasional suatu sistem arsitektural. Sementara itu, pendekatan desain spekulatif membuka ruang eksplorasi terhadap skenario masa depan dalam merespons krisis kemanusiaan dan lingkungan.

Kombinasi kedua pendekatan ini memungkinkan arsitektur dikembangkan secara visioner tanpa mengabaikan hukum alam. Dengan demikian, desain spekulatif diposisikan sebagai metode perancangan yang berakar pada sains, di mana fisika menjadi landasan objektif dan spekulasi berfungsi sebagai alat eksplorasi konseptual dalam merumuskan arsitektur nonterrestrial yang rasional dan relevan.

2.9 Studi Preseden Infrastruktur Produksi & Logistik

2.9.1 Preseden Infrastruktur Kemanusiaan Mobile

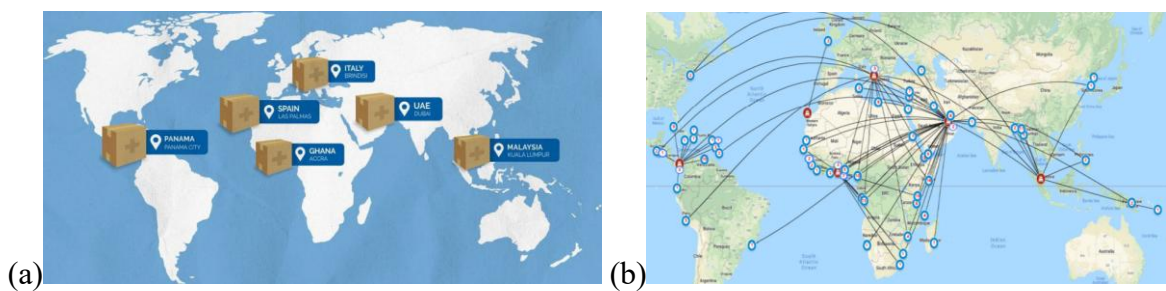
Sebagai jaringan logistik global yang dikelola oleh World Food Programme (WFP), United Nations Humanitarian Response Depot (UNHRD) merupakan salah satu preseden paling relevan dalam membaca infrastruktur kemanusiaan kontemporer. UNHRD tidak sekadar berfungsi sebagai gudang penyimpanan bantuan, melainkan sebagai sistem distribusi respons cepat berbasis *prepositioning strategy*, di mana stok darurat ditempatkan di beberapa titik strategis dunia untuk mempercepat respons saat terjadi krisis. Dengan demikian, nilai presedennya bukan terletak pada bentuk arsitektural semata, melainkan pada logika sistemik yang menopang operasionalnya.



Gambar 2. 7 United Nations Humanitarian Response Depots

(Sumber: UNOPS, 2018)

Secara konseptual, UNHRD dibangun di atas prinsip sentralisasi terdistribusi (*distributed centralization*). Artinya, ia memiliki beberapa hub utama di berbagai kawasan global yang terhubung melalui jaringan logistik internasional. Sistem ini mengandalkan stabilitas infrastruktur darat dan udara bandara internasional, pelabuhan laut, serta jaringan transportasi regional sebagai prasyarat operasionalnya. Dalam kerangka ini, UNHRD merepresentasikan model infrastruktur kemanusiaan berbasis daratan yang terintegrasi secara global, dengan orientasi utama pada efisiensi waktu respons dan optimasi rantai pasok.



Gambar 2. 8 (a) Enam depot UNHRD, (b) Peta Pengiriman Logistik

(Sumber: Eligüzel, İ.M., et.al, 2022)

Dari sisi operasional, UNHRD bekerja melalui mekanisme penyimpanan stok darurat seperti tenda, peralatan medis, unit WASH, dan rumah sakit modular yang dapat segera

dikirim ketika terjadi bencana. Sistemnya bersifat reaktif, diaktifkan setelah krisis terjadi, dan sangat bergantung pada aksesibilitas wilayah terdampak. Pengiriman bantuan dilakukan melalui pesawat kargo, kapal laut, maupun jalur darat, tergantung kondisi geografis dan politik setempat. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun UNHRD memiliki kapasitas mobilisasi tinggi, sistemnya tetap bertumpu pada ketersediaan runway, izin lintas batas, dan stabilitas geopolitik.

Dalam aspek produksi dan distribusi, UNHRD tidak memiliki sistem produksi mandiri. Seluruh komoditas diperoleh melalui vendor global yang tersebar di berbagai negara. Dengan demikian, sistem yang terbentuk adalah rantai pasok linear: manufaktur global → hub penyimpanan → wilayah terdampak. Model ini efisien dalam kondisi normal, namun rentan terhadap gangguan seperti konflik berskala besar, embargo, kerusakan infrastruktur bandara, atau disrupsi rantai pasok internasional. Tidak adanya sistem sirkular atau *closedloop metabolisme* membuat UNHRD belum sepenuhnya resilien terhadap isolasi jangka panjang.

Secara spasial, organisasi ruang UNHRD didominasi tipologi gudang horizontal dengan sistem modular, area *loading dock*, penyimpanan dingin, dan kedekatan langsung dengan fasilitas bandara atau pelabuhan. Arsitekturnya bersifat industrial, efisien, dan berorientasi pada optimalisasi penyimpanan serta distribusi. Ruang dirancang untuk memaksimalkan kapasitas dan kecepatan bongkarmuat, bukan untuk produksi atau adaptasi vertikal. Karakter ini menegaskan bahwa UNHRD adalah infrastruktur logistik darat yang sangat terikat pada stabilitas tanah sebagai basis operasional.

Kelebihan utama sistem ini terletak pada kematangan jaringan globalnya, standarisasi logistik yang tinggi, serta kapasitas koordinasi multinasional yang telah teruji dalam berbagai krisis kemanusiaan. Namun demikian, terdapat sejumlah keterbatasan mendasar: ketergantungan pada akses darat dan udara konvensional, tidak adanya produksi lokal, sistem distribusi yang linear, serta kerentanan terhadap gangguan geopolitik dan kerusakan infrastruktur. Dalam konteks krisis iklim ekstrem atau konflik berkepanjangan yang mengakibatkan isolasi wilayah, model ini berpotensi mengalami stagnasi operasional.

Dalam kerangka benchmark plausibility menuju model hibrida darat–udara, UNHRD dapat dibaca sebagai tahap evolusi pertama dari infrastruktur kemanusiaan global.

Transformasi yang mungkin dilakukan bukan sekadar perubahan bentuk fisik, melainkan rekonfigurasi sistem. Model hibrida dapat menggeser paradigma dari *centralized warehouse network* menjadi *distributed autonomous logistic ecosystems*, di mana node logistik tidak hanya berada di darat, tetapi juga memiliki kapasitas udara melalui platform VTOL, drone kargo, atau bahkan *airborne staging units*. Dengan pendekatan ini, ketergantungan pada runway konvensional dapat dikurangi, dan distribusi dapat dilakukan langsung ke titik krisis yang sulit dijangkau.

Selain itu, transformasi sistem produksi menjadi lebih semimandiri melalui integrasi mikrofabrikasi, pencetakan modular, sistem energi surya, dan pengolahan air mandiri dapat membentuk metabolisme tertutup berskala terbatas. Organisasi ruang pun dapat berevolusi dari gudang horizontal menjadi struktur modular vertikal yang mampu berfungsi sebagai *airdock* sekaligus pusat distribusi. Dengan demikian, infrastruktur tidak lagi sepenuhnya bergantung pada tanah sebagai satu-satunya basis eksistensi, tetapi menjadi sistem hibrida yang mampu beroperasi pada antarmuka darat dan udara.

Secara teknologi, sebagian komponen transformasi tersebut telah memiliki dasar eksperimental seperti drone kargo, struktur modular ringan, dan sistem energi otonom meskipun tantangan regulasi dan biaya tetap signifikan. Oleh karena itu, secara plausibilitas, transformasi menuju model hibrida darat–udara bukanlah utopia, melainkan evolusi sistemik yang masih berada dalam tahap transisi. Dalam perspektif ini, UNHRD menjadi preseden penting: ia menunjukkan bagaimana infrastruktur kemanusiaan global saat ini bekerja, sekaligus membuka ruang kritik dan kemungkinan rekonfigurasi menuju sistem yang lebih resilien terhadap isolasi, disrupsi geopolitik, dan krisis multidimensi masa depan.

Dengan demikian, preseden UNHRD memperkuat gagasan bahwa infrastruktur kemanusiaan masa depan seperti AERONOMED harus berbasis pada fleksibilitas, modularitas, dan integrasi jaringan global. Pendekatan *nodenetwork* menjadi fondasi konseptual yang memungkinkan arsitektur berfungsi sebagai bagian dari sistem distribusi kehidupan yang adaptif, responsif, dan mampu beroperasi dalam kondisi krisis yang terus berubah.

2.9.2 Preseden Bangunan Produksi Pangan Tertutup

Sebagai salah satu pelopor pertanian vertikal berbasis *Controlled Environment Agriculture* (CEA), AeroFarms menghadirkan preseden penting dalam memahami bangunan produksi pangan tertutup sebagai sistem, bukan sekadar tipologi bentuk. Model yang dikembangkan AeroFarms merepresentasikan pergeseran radikal dari pertanian berbasis lahan menuju pertanian berbasis infrastruktur, di mana bangunan berfungsi sebagai ekosistem buatan yang sepenuhnya mengendalikan variabel pertumbuhan tanaman. Dalam sistem ini, tanah, musim, dan kondisi iklim eksternal tidak lagi menjadi faktor penentu utama produksi, karena seluruh proses biologis berlangsung dalam lingkungan tertutup yang dikontrol secara presisi melalui teknologi sensor, pencahayaan LED spektrum khusus, serta sistem aeroponik berbasis kabut nutrisi.

Konsep dasar yang melandasi AeroFarms adalah produksi pangan sebagai sistem industri tertutup yang terlepas dari ketergantungan geografis. Tanaman tidak ditanam di tanah, melainkan pada media berbasis kain dengan akar yang disemprot kabut nutrisi secara terukur. Seluruh parameter intensitas cahaya, komposisi nutrisi, suhu, kelembapan, dan sirkulasi udara dikendalikan melalui sistem digital berbasis data. Dengan pendekatan ini, bangunan berfungsi sebagai mesin metabolisme biologis yang mampu menghasilkan panen sepanjang tahun tanpa siklus musiman. Prinsip ini menjadikan CEA sebagai bentuk arsitektur produktif yang menginternalisasi alam ke dalam ruang tertutup, menggantikan ketidakpastian lingkungan eksternal dengan stabilitas buatan.

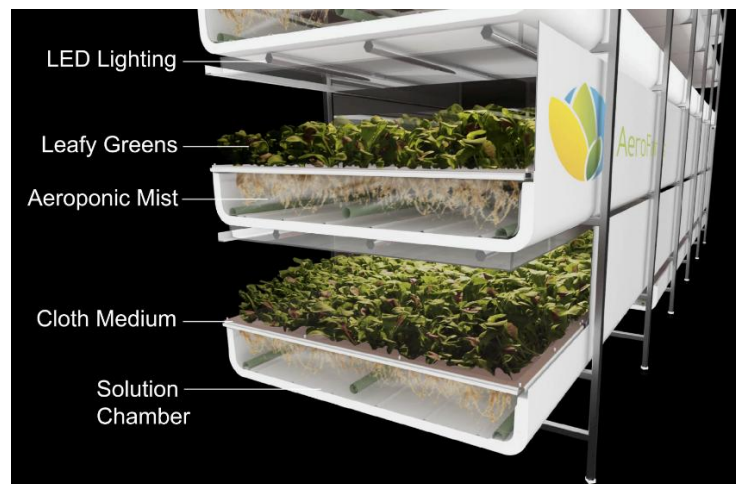


Gambar 2. 9 AeroFarms Agriculture

(Sumber: AeroFarms, 2025)

Dari sisi operasional, sistem AeroFarms bersifat terotomatisasi dan berbasis analitik. Sensor memantau pertumbuhan tanaman secara realtime, sementara algoritma mengoptimalkan fase cahaya dan nutrisi sesuai kebutuhan spesifik setiap varietas. Sistem ini memungkinkan efisiensi air yang sangat tinggi melalui daur ulang internal, sekaligus menghilangkan kebutuhan pestisida karena lingkungan tertutup mengurangi paparan patogen eksternal. Namun demikian, stabilitas sistem sangat bergantung pada ketersediaan energi listrik yang konstan, terutama untuk pencahayaan LED dan sistem HVAC. Ketergantungan ini menjadi salah satu titik kritis dalam konteks krisis energi atau gangguan infrastruktur.

Dalam aspek produksi dan distribusi, model AeroFarms bersifat intensif ruang dengan konfigurasi vertikal bertingkat (*stacked growing racks*). Setiap meter persegi ruang dioptimalkan melalui penumpukan lapisan produksi, sehingga output per luas tapak jauh melampaui pertanian konvensional. Sistem ini umumnya terintegrasi dengan distribusi lokal, mempersingkat jarak pengiriman dan mengurangi *food miles*. Namun, meskipun produksi berlangsung dalam sistem semitertutup, distribusi tetap bergantung pada infrastruktur darat dan jaringan energi eksternal. Dengan demikian, meskipun resilien terhadap perubahan iklim dan degradasi lahan, sistem ini belum sepenuhnya otonom.



Gambar 2. 10 Sistem Pelapisan Media Pertanian AeroFarms

(Sumber: AeroFarms, 2004)

Secara spasial, organisasi ruang AeroFarms menyerupai pabrik biologis. Zona produksi utama mendominasi interior dengan susunan rak vertikal modular yang

membentuk grid presisi. Area pembibitan, panen, pengepakan, dan kontrol sistem terintegrasi dalam satu kesatuan alur kerja yang efisien dan terukur. Ruangruang teknis seperti sistem nutrisi, pompa, dan HVAC menjadi tulang punggung operasional yang memastikan kestabilan iklim. Karakter ruang ini menunjukkan bahwa arsitektur CEA bukanlah ruang agraris terbuka, melainkan infrastruktur tertutup yang berfungsi sebagai mesin produksi kehidupan.

Kelebihan utama model ini terletak pada kemampuannya memproduksi pangan tanpa ketergantungan terhadap tanah dan musim, efisiensi air yang tinggi, serta produktivitas per luas yang signifikan. Sistem ini relatif tahan terhadap krisis iklim, banjir, kekeringan, dan degradasi lahan. Namun, kekurangannya mencakup konsumsi energi yang besar, investasi awal tinggi, keterbatasan jenis tanaman yang dapat diproduksi secara ekonomis, serta ketergantungan pada infrastruktur listrik stabil. Dalam konteks isolasi ekstrem atau disrupsi energi, sistem ini berpotensi mengalami gangguan serius.

Dalam kerangka benchmark plausibility menuju model hibrida darat–udara, AeroFarms dapat dibaca sebagai tahap evolusi pertama dari pertanian berbasis infrastruktur tertutup. Transformasi yang mungkin dilakukan bukan sekadar memindahkan bangunan ke lokasi lain, melainkan merancang ulang sistemnya menjadi modular, ringan, dan semimobil. Unit produksi dapat dikembangkan dalam bentuk pod CEA yang dapat diangkut melalui udara, diintegrasikan dengan platform VTOL, atau ditempatkan pada struktur terapung dan semimelayang. Dengan pendekatan ini, produksi pangan tidak lagi hanya terikat pada tapak darat permanen, tetapi dapat menjadi bagian dari jaringan distribusi vertikal yang terhubung langsung dengan sistem logistik udara.

Transformasi sistem operasional juga dapat diarahkan pada integrasi energi terbarukan mandiri, seperti panel surya terintegrasi, sistem penyimpanan baterai, atau teknologi hidrogen ringan, sehingga ketergantungan pada grid eksternal dapat dikurangi. Produksi dapat dikonfigurasi dalam skala mikroCEA yang dirancang untuk respons krisis, memungkinkan penyediaan pangan segar di wilayah pascabencana atau daerah terisolasi tanpa lahan subur. Organisasi ruang pun dapat berevolusi dari bangunan industri permanen menjadi modul tersegmentasi yang dapat dipasang, dilepas, dan direlokasi sesuai kebutuhan.

Secara teknologi, sebagian komponen transformasi ini telah tersedia mulai dari pertanian kontainer modular hingga sistem distribusi drone meskipun tantangan utama tetap pada berat struktur, efisiensi energi, serta regulasi ruang udara. Namun secara konseptual, evolusi menuju model hibrida darat–udara merupakan kelanjutan logis dari prinsip CEA itu sendiri, yaitu memisahkan produksi pangan dari ketergantungan terhadap tanah. Jika AeroFarms telah memutus keterikatan terhadap lahan dan musim, maka tahap berikutnya adalah memutus keterikatan terhadap tapak permanen. Dalam konteks ini, preseden AeroFarms menyediakan fondasi sistemik bagi pengembangan infrastruktur produksi pangan tertutup yang dapat menjadi bagian dari jaringan kemanusiaan mobile, resilien terhadap isolasi, dan adaptif terhadap krisis multidimensional.

2.9.3 Preseden Transportasi Udara Angkut Berat

Helikopter angkut berat Mil Mi26 merupakan salah satu preseden paling signifikan dalam membaca sistem transportasi udara untuk muatan besar dalam konteks militer, sipil, maupun kemanusiaan. Dikembangkan oleh biro desain Mil di era Uni Soviet, Mi26 dikenal sebagai helikopter operasional terbesar dan terkuat di dunia dalam kategori produksi massal. Namun relevansinya sebagai preseden tidak terletak semata pada dimensi fisik atau kapasitas angkutnya, melainkan pada sistem mobilitas vertikal yang memungkinkan pemindahan beban berat secara langsung tanpa ketergantungan pada runway. Dalam konteks infrastruktur hibrida darat–udara, Mi26 menunjukkan bagaimana udara dapat berfungsi sebagai medium logistik struktural, bukan sekadar jalur transportasi sekunder.

Konsep dasar Mi26 adalah *vertical heavylift mobility*, yaitu kemampuan mengangkat muatan besar melalui sistem rotor tanpa memerlukan landasan pacu konvensional. Berbeda dengan pesawat kargo yang bergantung pada bandara, helikopter ini dirancang untuk mendarat atau melakukan *hovering drop* di lokasi terpencil, wilayah konflik, atau area pascabencana. Prinsipnya adalah fleksibilitas akses: menghubungkan titik yang tidak memiliki infrastruktur memadai dengan sistem logistik yang lebih besar. Dalam kerangka sistemik, Mi26 merepresentasikan pergeseran dari logistik berbasis infrastruktur tetap menuju logistik berbasis kemampuan manuver udara.

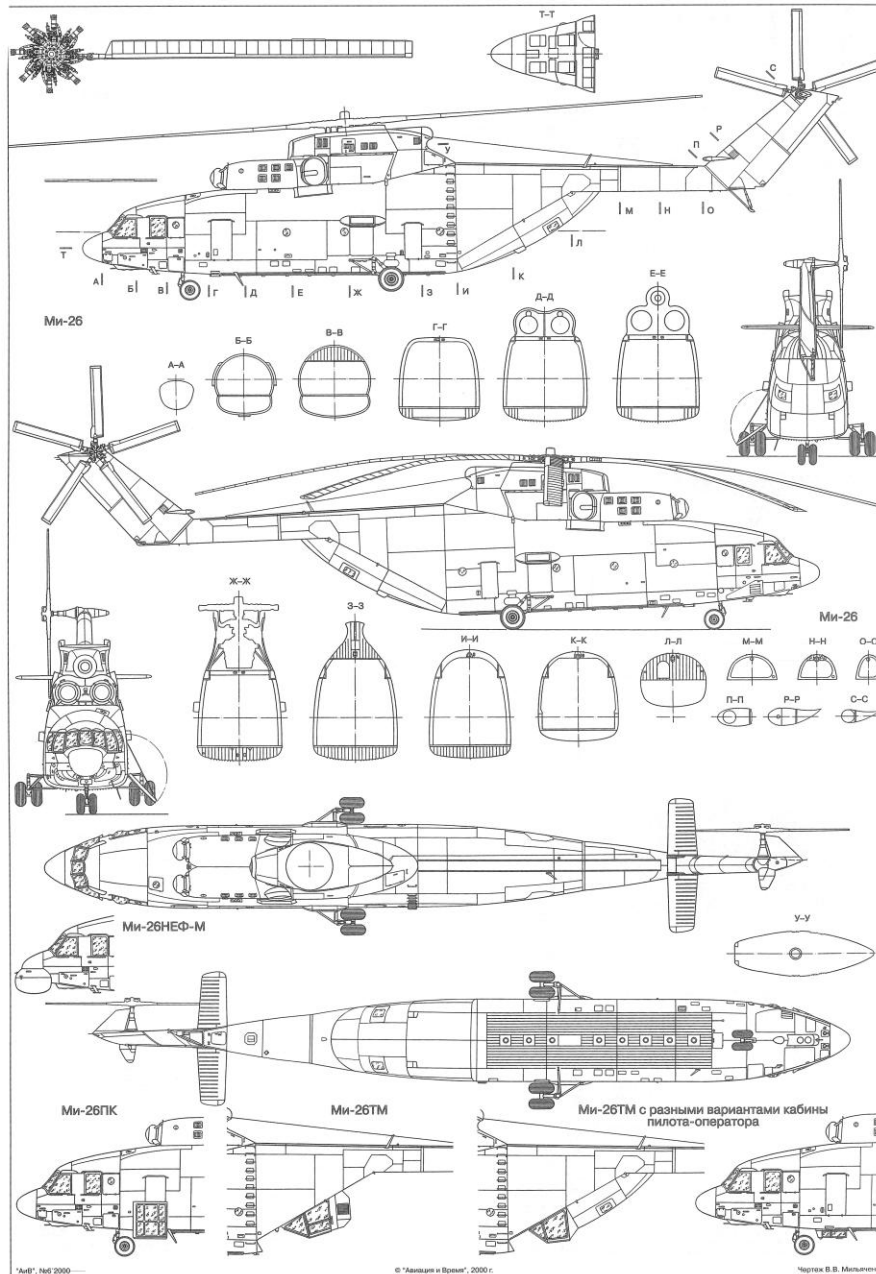
Secara operasional, Mi26 mampu mengangkut muatan hingga sekitar 20 ton, baik di dalam kabin maupun melalui sling eksternal. Sistemnya memungkinkan pengangkutan

kendaraan lapis baja, modul konstruksi, peralatan berat, hingga bantuan kemanusiaan dalam jumlah besar. Operasionalnya fleksibel: dapat melakukan pendaratan langsung, *hover loading*, maupun pengiriman tanpa mendarat. Keunggulan ini menjadikannya alat vital dalam misi penyelamatan, distribusi logistik di daerah pegunungan, dan evakuasi darurat.

Namun, sistem operasionalnya sangat bergantung pada bahan bakar avtur, kru terlatih, serta pemeliharaan teknis intensif. Radius operasional dan durasi terbang ditentukan oleh kapasitas bahan bakar dan kondisi cuaca. Dengan demikian, meskipun independen dari runway, sistem ini tetap terikat pada basis darat sebagai titik pengisian dan perawatan.

Dalam sistem distribusi logistik, Mi26 berfungsi sebagai *connector node* antara pusat logistik darat dan titik distribusi yang sulit dijangkau. Ia tidak memproduksi barang, tetapi menjadi medium transfer yang memperpendek waktu distribusi dan mengatasi hambatan geografis seperti sungai, hutan lebat, atau reruntuhan pascabencana.

Distribusi yang difasilitasi Mi26 bersifat langsung dan vertikal. Tidak diperlukan infrastruktur jalan atau jembatan; muatan dapat diturunkan tepat di lokasi tujuan. Dalam konteks kemanusiaan, hal ini berarti bantuan dapat tiba lebih cepat tanpa menunggu perbaikan infrastruktur darat. Namun sistem ini tetap linear: dari basis darat → udara → titik tujuan, tanpa integrasi produksi atau sistem tertutup.



Gambar 2. 11 Mil Mif26 1981 Blueprint

(Sumber: *Air Charter Service*, 1981)

Organisasi ruang Mi26 dirancang sebagai ruang kargo fleksibel dengan konfigurasi terbuka dan pintu belakang lebar untuk memudahkan bongkar muat. Interiornya dapat dikonfigurasi ulang sesuai jenis muatan, sementara sistem sling eksternal memungkinkan pengangkutan objek berukuran besar yang tidak muat di dalam kabin. Secara spasial,

helikopter ini merupakan ruang transit, bukan ruang produksi atau hunian. Ia adalah ruang mobilitas arsitektur bergerak yang memfasilitasi perpindahan massa dan material.

Struktur internalnya memperlihatkan efisiensi volumetrik: ruang dimaksimalkan untuk kapasitas muat, sementara sistem avionik dan kokpit terpisah jelas dari zona kargo. Ini menunjukkan bahwa organisasi ruang ditentukan oleh logika distribusi dan berat, bukan kenyamanan atau permanensi.

Kelebihan utama Mi26 terletak pada kapasitas angkut besar, fleksibilitas pendaratan, dan kemampuan menjangkau wilayah tanpa infrastruktur. Ia mampu beroperasi di area terpencil, pascabencana, atau zona konflik yang tidak memiliki akses jalan. Sistem vertikalnya memungkinkan transfer muatan langsung dan cepat, mengurangi waktu respons dalam situasi darurat.

Secara sistemik, Mi26 menunjukkan bahwa udara dapat menjadi jalur distribusi primer ketika daratan gagal berfungsi.

Kekurangannya meliputi konsumsi bahan bakar tinggi, biaya operasional besar, kebisingan, serta ketergantungan pada kondisi cuaca. Selain itu, kapasitas angkut tetap terbatas dibandingkan kapal laut atau pesawat kargo besar. Sistem ini juga tidak otonom; ia memerlukan basis logistik darat untuk perawatan dan pengisian bahan bakar. Dalam skenario krisis energi atau pembatasan ruang udara, operasionalnya dapat terganggu.

Dalam konteks transformasi menuju model hibrida darat–udara, Mi26 dapat dipahami sebagai prototipe mobilitas vertikal berat yang membuka kemungkinan integrasi lebih jauh antara sistem udara dan infrastruktur tetap. Transformasi spekulatif dapat mengarah pada pengembangan *airborne docking systems*, di mana helikopter berat tidak hanya mengangkut muatan, tetapi berinteraksi langsung dengan platform modular terapung atau struktur semimelayang.

Model hibrida dapat mengembangkan konsep *mobile logistic node*, yaitu platform udara yang mampu membawa modul produksi, energi, atau distribusi, lalu menghubungkannya dengan node darat tanpa perlu pendaratan penuh. Integrasi dengan sistem energi alternatif seperti hibrida listrik atau hidrogen dapat mengurangi

ketergantungan bahan bakar fosil. Selain itu, sistem otonom atau semiotonom dapat mengurangi kebutuhan kru dan meningkatkan efisiensi.

Dalam skenario yang lebih lanjut, konsep heavylift dapat berevolusi menjadi jaringan udara terkoordinasi, di mana beberapa unit bekerja secara sinkron mengangkut modul infrastruktur seperti unit CEA, klinik darurat, atau depot logistik yang dapat dirakit di udara atau langsung dipasang di lokasi krisis. Dengan demikian, helikopter tidak lagi hanya berfungsi sebagai kendaraan, tetapi sebagai bagian dari sistem konstruksi dan distribusi vertikal.

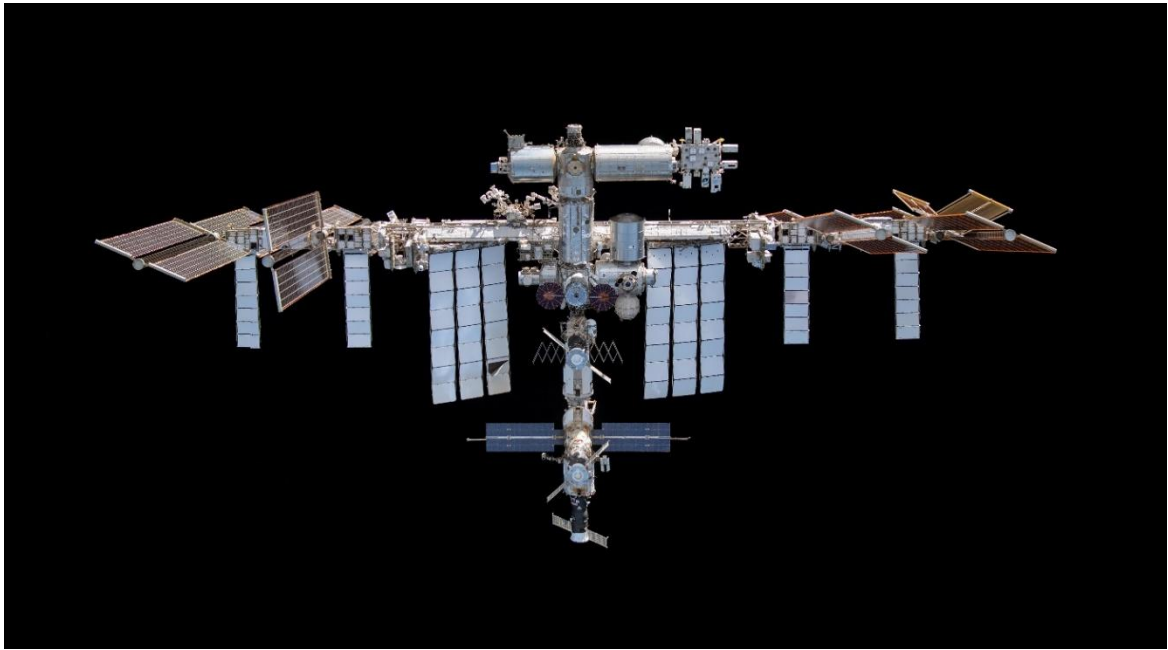
Secara plausibilitas, teknologi heavylift sudah terbukti operasional. Tantangan utamanya terletak pada efisiensi energi, regulasi ruang udara, dan biaya. Namun secara sistemik, transformasi menuju model hibrida darat–udara merupakan kelanjutan logis dari kemampuan mobilitas vertikal yang telah dimiliki Mi26. Ia membuktikan bahwa beban besar dapat dipindahkan tanpa infrastruktur landasan tetap; tahap berikutnya adalah mengintegrasikan mobilitas tersebut dengan sistem produksi dan distribusi yang lebih otonom.

Dengan demikian, sebagai preseden, Mil Mi26 tidak hanya menunjukkan kapasitas angkut berat, tetapi memperlihatkan paradigma bahwa udara dapat menjadi perpanjangan struktural dari daratan. Dalam konteks pengembangan infrastruktur kemanusiaan hibrida, ia menyediakan dasar empiris bahwa logistik vertikal berskala besar bukanlah spekulasi semata, melainkan realitas operasional yang dapat ditransformasikan lebih lanjut menuju sistem yang lebih adaptif dan resilien.

2.9.4 Preseden Infrastruktur Spekulatif

International Space Station (ISS) dapat dibaca sebagai preseden infrastruktur spekulatif bukan karena bentuknya yang ikonik, melainkan karena sistem yang menopangnya sebagai ekosistem buatan dalam kondisi ekstrem. ISS dirancang sebagai habitat otonom yang mampu mempertahankan kehidupan manusia di orbit melalui sistem tertutup (closedloop system), modularitas yang dapat diperluas, serta interoperabilitas lintas negara dan teknologi. Konsep dasarnya bukan sekadar tempat tinggal, tetapi arsitektur sebagai mesin kehidupan (architecture as lifesupport system), di mana setiap elemen bekerja secara metabolik: energi diproduksi, air didaur ulang, oksigen dihasilkan, dan limbah

dikelola secara terintegrasi. Dalam konteks spekulasi arsitektur, pendekatan ini membuka kemungkinan bahwa infrastruktur masa depan terutama model hibrida darat–udara harus dipahami sebagai sistem ekologis otonom yang mampu beroperasi dalam tekanan lingkungan urban dan krisis iklim.



Gambar 2. 12 International Space Station

(Sumber: Nasa, 1998)

Secara operasional, ISS berjalan melalui sistem kontrol lingkungan dan penunjang kehidupan (ECLSS), panel surya sebagai sumber energi utama, sistem docking untuk logistik, serta monitoring realtime berbasis sensor dengan tingkat redundansi tinggi. Operasi berlangsung 24 jam dengan protokol keselamatan ekstrem dan integrasi antara otomasi serta kontrol manual. Jika ditransformasikan ke model darat–udara, prinsip ini dapat diwujudkan melalui microgrid energi terdesentralisasi, sistem pemantauan kualitas udara dan suhu berbasis sensor kota, platform docking drone untuk distribusi logistik vertikal, serta sistem pemeliharaan modular tanpa menghentikan fungsi utama bangunan. Artinya, infrastruktur urban masa depan dapat beroperasi seperti stasiun orbital: terusmenerus aktif, adaptif, dan resilien terhadap gangguan.

Dalam aspek produksi dan distribusi, ISS menerapkan model kombinasi antara produksi internal dan suplai eksternal. Energi dihasilkan melalui panel surya, air didaur

ulang dari uap kondensasi dan urin, oksigen diperoleh melalui elektrolisis, dan limbah dikelola secara ketat untuk meminimalkan kehilangan sumber daya. Prinsip closedloop ini menunjukkan efisiensi ekstrem dalam pengelolaan metabolisme ruang. Untuk model hibrida darat–udara, sistem tersebut dapat diterjemahkan menjadi pertanian vertikal, daur ulang air skala bangunan atau kawasan, produksi energi surya dan angin pada elevasi tinggi, serta distribusi barang menggunakan jaringan drone. Transformasi ini tidak lagi bersifat utopis karena teknologi pendukungnya telah berkembang, meskipun masih memerlukan integrasi sistemik yang matang.

Organisasi ruang ISS memperlihatkan logika modular yang tidak bergantung pada orientasi horizontal. Modulmodul terhubung melalui node penghubung, memungkinkan ekspansi bertahap dan distribusi fungsi yang fleksibel. Ruang tidak dipahami sebagai lantai bertingkat konvensional, melainkan sebagai rangkaian kapsul dan koridor yang membentuk jaringan spasial tiga dimensi. Prinsip ini relevan untuk model darat–udara yang mengandalkan sistem pod, vertical spine, skybridge, dan node distribusi sebagai titik temu antara permukaan tanah dan platform udara. Dengan demikian, struktur tidak lagi terikat pada tipologi menara tradisional, melainkan berkembang sebagai jaringan vertikal yang bersifat adaptif.

Sebagai preseden, ISS memiliki sejumlah kelebihan, antara lain resiliensi tinggi, efisiensi sumber daya, modularitas, dan kemampuan beroperasi dalam kondisi ekstrem. Namun, terdapat pula keterbatasan seperti biaya yang sangat besar, kompleksitas teknologi, serta ketergantungan pada suplai eksternal berkala. Kekurangan ini menjadi catatan penting dalam benchmark plausibility: model hibrida darat–udara tidak boleh sepenuhnya terlepas dari jaringan kota, tetapi harus membangun keseimbangan antara otonomi dan keterhubungan. Secara teknologi, sebagian besar prinsip ISS sudah dapat diadaptasi di bumi; secara ekonomi, konstruksi modular bertahap lebih memungkinkan; secara ekologis, sistem tertutup sangat relevan untuk mitigasi krisis iklim; dan secara sosial, infrastruktur tersebut harus dirancang inklusif, tidak eksklusif seperti kru terbatas ISS.

Dengan demikian, ISS dapat ditransformasikan secara spekulatif menjadi model urban atmospheric node atau hybrid ground–aerial infrastructure yang berfungsi sebagai hub energi, produksi pangan vertikal, pusat distribusi udara bersih, dan simpul logistik berbasis

drone. Transformasi ini tidak meniru bentuk stasiun luar angkasa, melainkan mengadopsi prinsip metabolik dan modularitasnya. Dalam kerangka tersebut, arsitektur tidak lagi dipahami sebagai objek statis, tetapi sebagai organisme infrastruktur yang hidup menghasilkan, mendaur ulang, mendistribusikan, dan beradaptasi. ISS menunjukkan bahwa masa depan infrastruktur bukan terletak pada monumentalitas bentuk, melainkan pada kecerdasan sistem yang mampu menopang kehidupan dalam kondisi paling ekstrem sekalipun, baik di orbit maupun di kota.