

Arsitektur Amfibi dan Struktur Apung: Rekayasa Sipil-Arsitektur Menghadapi Ancaman Tenggelamnya Kota-Kota Pesisir Global

Muhammad Afiq

UIN Walisongo Semarang

Muhammad_afiq@walisongo.ac.id

Published: Mei, 2026

ABSTRAK

Kenaikan permukaan air laut global yang dipicu oleh perubahan iklim, dikombinasikan dengan amblesan tanah (*land subsidence*) yang masif akibat ekstraksi air tanah antropogenik, mengancam eksistensi kota-kota pesisir metropolitan di seluruh dunia. Paradigma rekayasa konvensional yang mengandalkan infrastruktur pertahanan kaku (*hard-engineered defenses*) seperti tanggul laut (*seamalls*) dan bendungan lepas pantai mulai menunjukkan batasan struktural, finansial, dan ekologisnya. Makalah ini menyajikan tinjauan komprehensif, integratif, dan futuristik mengenai "Arsitektur Amfibi" (*Amphibious Architecture*) dan "Struktur Apung Skala Besar" (*Very Large Floating Structures - VLFS*) sebagai pergeseran paradigma dari strategi "melawan air" menjadi "hidup bersama air". Melalui pendekatan lintas disiplin yang memadukan rekayasa sipil hidrodinamika dan desain arsitektur adaptif, artikel ini menganalisis material maju (*advanced materials*), sistem penjangkaran (*mooring systems*), mekanika struktur dinamis, serta pemodelan tata ruang perkotaan laut (*marine urbanism*). Hasil analisis menunjukkan bahwa integrasi bangunan amfibi berbasis fondasi ponton fleksibel dan VLFS modular tidak hanya mereduksi risiko katastrofe banjir secara signifikan, melainkan juga memulihkan ekosistem pesisir, menghemat biaya siklus hidup infrastruktur, dan menyediakan ruang urban baru yang resilien untuk masa depan peradaban manusia.

Kata Kunci: *Arsitektur Amfibi, Struktur Apung Skala Besar, Amblesan Tanah, Rekayasa Pesisir, Urbanisme Laut, Resiliensi Iklim.*

© The Author(s). 2021 Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

PENDAHULUAN

Abad ke-21 ditandai oleh konvergensi dua krisis spasial terbesar dalam sejarah peradaban manusia: urbanisasi massal dan perubahan iklim global. Saat ini, lebih dari sebelas persen populasi dunia tinggal di kawasan pesisir dengan elevasi rendah, kurang dari sepuluh meter di atas permukaan laut. Kawasan ini mencakup kota-kota megapolitan utama yang menjadi penggerak ekonomi global seperti Jakarta, Bangkok, Dhaka, Ho Chi Minh City, Venice, Rotterdam, New York, Miami, dan Tokyo. Berdasarkan laporan Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), proyeksi kenaikan permukaan air laut global akibat pencairan glasial di kutub dan ekspansi termal air laut akibat pemanasan global diperkirakan akan melewati angka satu meter pada tahun 2100 dalam skenario emisi tinggi (Griggs & Reguero, 2021).

Namun, bagi banyak kota metropolitan di negara berkembang, ancaman yang jauh lebih mendesak dan destruktif bukanlah sekadar kenaikan air laut global yang berjalan lambat, melainkan fenomena amblesan tanah antropogenik (*anthropogenic land subsidence*). Di beberapa wilayah pesisir Jakarta Utara dan Bangkok, misalnya, laju penurunan muka tanah telah mencapai angka yang sangat mengkhawatirkan, yaitu antara sepuluh hingga dua puluh sentimeter per tahun. Penurunan ini dipicu secara masif oleh ekstraksi air tanah secara ilegal dan tidak terkendali untuk kebutuhan industri serta domestik, yang diperparah oleh beban statis raksasa dari gedung-gedung bertingkat tinggi dan kegagalan pemulihan formasi akuifer bawah tanah. Kombinasi dari kenaikan air laut absolut dan penurunan muka tanah lokal ini menciptakan fenomena kenaikan air laut relatif yang eksponensial. Skenario katastrofe ini memproyeksikan bahwa sebagian besar wilayah urban pesisir global akan berada di bawah permukaan

laut secara permanen dalam hitungan dekade, mengubah jutaan penduduk menjadi pengungsi iklim (*climate refugees*) (Nicholls et al., 2021).

Secara historis, respons teknik sipil tradisional terhadap ancaman hidrologis adalah menerapkan strategi perang frontal melawan alam. Batas kaku dibangun untuk memisahkan daratan dari air. Konstruksi tanggul laut raksasa (*giant seawalls*), tanggul penahan banjir di sepanjang bantaran sungai, pengurukan lahan pesisir (*reklamasi*), dan pengaktifan sistem pompa mekanis skala mega telah menjadi solusi standar di berbagai belahan dunia. Pendekatan "pola pertahanan kaku" (*hard-engineered defenses*) ini mengadopsi pola pikir statis yang berasumsi bahwa masa depan hidrologis dapat diprediksi berdasarkan data historis masa lalu (Griggs & Reguero, 2021).

Namun, di era ketidakpastian iklim ekstrem saat ini, pendekatan kaku ini mulai menyingkap kelemahan sistemik, ekologis, dan finansial yang fatal (Wu et al., 2024):

1. Perangkap Kerentanan dan Kegagalan Katastrofik (*The Vulnerability Paradox*): Pembangunan tanggul laut raksasa sering kali menciptakan rasa aman palsu (*false sense of security*) bagi masyarakat dan investor. Hal ini memicu percepatan pembangunan properti bernilai tinggi tepat di balik dinding tanggul. Ketika tanggul tersebut mengalami kegagalan struktural atau bobol akibat hantaman badai yang melampaui kapasitas desain—seperti yang terjadi pada Badai Katrina di New Orleans atau Badai Sandy di New York—dampak kerusakan ekonomi dan korban jiwa yang dihasilkan justru jauh lebih masif dibandingkan jika tanggul tersebut tidak pernah dibangun.

2. Degradasi Ekologis dan Gangguan Hidrodinamika Pantai: Tanggul beton kaku memutus interaksi sedimen alami antara laut, muara sungai, dan daratan. Struktur ini menghancurkan ekosistem lahan basah pesisir, merusak hutan mangrove yang bertindak sebagai perisai badai alami, mengubah pola arus laut lokal, dan mempercepat laju erosi pantai (*abrasi*) di wilayah-wilayah tetangga yang tidak terlindungi oleh tanggul.

3. Inkonsistensi Finansial dan Batas Fisik Meninggikan Struktur: Mengingat laju penurunan tanah terus berjalan, pertahanan kaku mengharuskan pemerintah untuk meninggikan dan memperkuat struktur tanggul secara terus-menerus. Proses rekonstruksi berkala ini membutuhkan alokasi biaya ekonomi yang tumbuh secara eksponensial. Pada titik tertentu, batas daya dukung tanah geoteknik di bawah tanggul akan tercapai, membuat struktur beton tersebut terlalu berat dan amblas ke dalam tanah liat pesisir yang lunak.

Menghadapi keterbatasan nyata dari paradigma pertahanan kaku ini, peradaban manusia membutuhkan transformasi radikal dalam filsafat rekayasa sipil dan perancangan arsitektur. Paradigma baru ini mengharuskan kita untuk bergeser dari strategi statis-defensif yang berupaya melawan air (*fighting the water*) menuju strategi dinamis-adaptif yang merangkul keberadaan air sebagai elemen inti dari ruang hidup peradaban (*yielding to water* atau *living with water*) (Liang et al., 2026).

Artikel ilmiah ini mengeksplorasi secara mendalam, kritis, dan multi-skala dua teknologi revolusioner yang menjadi pilar utama dari paradigma sirkular adaptif ini: Arsitektur Amfibi, yang merujuk pada struktur bangunan berbasis darat yang dirancang secara mekanis untuk mengapung secara vertikal hanya ketika banjir terjadi, dan Struktur Apung Skala Besar (*Very Large Floating Structures* - VLFS), yang merujuk pada modul-modul pulau buatan permanen di atas permukaan laut sebagai ruang ekspansi perkotaan yang mandiri, sirkular, dan sepenuhnya kebal terhadap fluktuasi air laut maupun amblesan tanah.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan pendekatan metodologi lintas disiplin terpadu. Pendekatan ini mengintegrasikan prinsip-prinsip mekanika rekayasa sipil, analisis hidrodinamika laut, riset material maju, dan teori perencanaan tata ruang arsitektur perkotaan sirkular.

1. Pemodelan Hidrodinamika dan Interaksi Fluida-Struktur (FSI)

Analisis perilaku dinamis dari struktur amfibi dan terapung di bawah pengaruh beban lingkungan pantai yang mencakup fluktuasi pasang-surut, gelombang badai (*storm surges*), arus laut, dan beban angin dievaluasi menggunakan prinsip-prinsip mekanika fluida canggih. Pemodelan dilakukan melalui simulasi komputer interaksi fluida-struktur (*Fluid-Structure Interaction* - FSI) (Ye et al., 2024).

Gaya angkat hidrostatik dihitung berdasarkan hukum hukum Archimedes, di mana berat total struktur bangunan harus diimbangi sepenuhnya oleh gaya ke atas yang dihasilkan oleh volume air yang

dipindahkan oleh sistem ponton lambung bawah. Evaluasi terhadap stabilitas apung global dilakukan dengan menentukan tinggi metasentrik bangunan secara rigid. Tinggi metasentrik mengukur jarak geometris antara pusat gravitasi total bangunan, pusat tekanan hidrostatis air, dan metasentrum struktur. Desain bangunan amfibi maupun VLFS dinyatakan aman dan stabil secara dinamis apabila nilai tinggi metasentrik tetap bernilai positif dalam semua skenario konfigurasi pembebanan, baik beban mati struktural maupun beban hidup interior yang bergerak dinamis. Hal ini memastikan bahwa struktur memiliki momen pemulih (*righting moment*) alami untuk kembali ke posisi tegak lurus sempurna ketika dihantam oleh kemiringan akibat gaya luar (Jiang et al., 2023).

2. Analisis Geoteknik dan Mekanika Tanah Pesisir

Karakteristik tanah liat pesisir yang lunak (*soft marine clay*) dianalisis untuk memahami interaksi fondasi pada bangunan amfibi saat berada dalam kondisi kering, serta efek hisap (*suction effect*) yang terjadi pada antarmuka tanah-ponton ketika air banjir mulai masuk dan mengangkat bangunan. Parameter mekanika tanah seperti kohesi, sudut geser dalam, indeks kompresibilitas, dan koefisien konsolidasi dievaluasi untuk merancang sistem pemandu vertikal yang mampu menahan gaya lateral angin dan arus tanpa mengalami kegagalan tekuk (*buckling failure*) (Sankalp & Leeneer, 2019).

3. Simulasi Tata Ruang Perkotaan Berbasis Geografis (GIS)

Penelitian ini menggunakan Sistem Informasi Geografis (GIS) untuk memetakan wilayah pesisir dengan kepadatan tinggi yang mengalami risiko banjir rob paling parah di Asia Tenggara dan Eropa Barat. Pemetaan ini digunakan untuk mensimulasikan efektivitas spasial dari penerapan kluster perumahan amfibi dan VLFS dalam mengabsorpsi dampak luapan air, serta mengukur kapasitas tampung populasi baru tanpa melakukan pengusuran destruktif atau reklamasi konvensional yang merusak aliran hidrologis pantai (Nijah Akram et al., 2026).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Arsitektur Amfibi

1. Anatomi Sistemik Bangunan Amfibi

Arsitektur amfibi tidak boleh disamakan dengan arsitektur rumah terapung permanen seperti rumah perahu (*houseboats*). Bangunan amfibi adalah sebuah sistem arsitektur hibrida yang cerdas. Dalam kondisi cuaca normal di mana tidak terjadi banjir atau luapan pasang rob, bangunan ini berfungsi sepenuhnya sebagai rumah atau gedung berbasis darat biasa yang duduk di atas tanah, selaras dengan estetika lingkungan sekitarnya. Namun, ketika bencana banjir datang dan air mulai merendam kawasan tersebut, bangunan ini secara otomatis merespons perubahan hidrologis tersebut dengan mengapung dengan aman di atas permukaan air. Ketika banjir surut, bangunan akan turun kembali secara perlahan dan presisi menuju posisi semula di atas tanah.

Sistem mekanika dan arsitektur bangunan amfibi bertumpu pada tiga komponen struktural utama yang bekerja secara sinergis dan terintegrasi:

A. Sistem Ponton Apung Terintegrasi (*Buoyancy Pan / Floating Pontoon*)

Komponen ini dipasang di bagian paling bawah struktur bangunan, bertindak sebagai fondasi apung utama. Ponton ini dirancang dengan massa jenis yang jauh lebih ringan daripada air, namun memiliki kekuatan struktural yang tinggi untuk menahan beban mati dari seluruh superstruktur bangunan di atasnya. Material penyusun ponton amfibi modern biasanya menggunakan balok *Expanded Polystyrene* (EPS) densitas tinggi berkekuatan mekanis yang dibungkus rapat oleh lapisan pelindung berupa beton bertulang serat mikro tebal (*ferrocement*) atau material komposit polimer khusus yang tahan terhadap kelembapan tanah, serangan rayap, dan pembusukan biologis (Dung et al., 2026).

B. Sistem Pemandu Vertikal (*Vertical Guidance System*)

Sistem pemandu ini adalah kunci keselamatan utama yang menjaga agar bangunan tidak hanyut terbawa oleh arus banjir yang deras atau terhempas oleh tiupan angin kencang saat berada dalam kondisi mengapung. Sistem ini terdiri dari tiang-tiang pemandu kaku (*guidance posts* atau *dolphins*) yang ditanam jauh ke dalam lapisan tanah keras di bawah permukaan menggunakan metode fondasi tiang pancang atau tiang bor. Tiang pemandu ini dihubungkan ke badan bangunan melalui cincin pemandu geser fleksibel (*sliding sleeves*) yang dilengkapi dengan bantalan roda berbahan nilon atau teflon. Mekanisme ini mengunci

pergerakan bangunan pada sumbu horizontal (sumbu x dan sumbu y) secara absolut, namun memberikan kebebasan bergerak tanpa hambatan pada sumbu vertikal (sumbu z), memungkinkan bangunan bergerak naik-turun mengikuti fluktuasi ketinggian air banjir secara presisi.

C. Sistem Utilitas Fleksibel Berdaya Regang Tinggi (*Flexible Utility Connections*)

Sebuah bangunan modern membutuhkan pasokan utilitas dasar yang konstan untuk mendukung kehidupan di dalamnya, seperti jaringan pipa air bersih, saluran pembuangan air limbah domestik, kabel pasokan listrik, dan kabel telekomunikasi jaringan internet. Pada bangunan amfibi, sistem utilitas konvensional yang kaku digantikan oleh jaringan utilitas fleksibel.

Pipa-pipa saluran dirancang menggunakan konektor teleskopik mekanis atau selang spiral komposit elastis berpelindung anyaman baja yang mampu meregang, memanjang, dan menekuk secara otomatis tanpa mengalami risiko kebocoran, patah, atau terputus saat bangunan terangkat hingga ketinggian maksimal beberapa meter di atas permukaan tanah. Jaringan listrik dilengkapi dengan kabel gulung otomatis (*retractable cable reels*) berinsulasi kedap air standar militer untuk mencegah risiko korsleting listrik yang fatal saat banjir melanda.

2. Tantangan Mekanika Struktur dan Geoteknik Sipil

Meskipun konsep dasar arsitektur amfibi terlihat sederhana, implementasi rekayasa sipilnya menghadapi tantangan mekanis yang kompleks pada fase transisi awal pergerakan bangunan dari kondisi kering menjadi kondisi mengapung.

A. Fenomena Daya Hisap Tanah (*Suction Effect*)

Ketika sebuah bangunan amfibi duduk di atas tanah liat pesisir yang basah dan jenuh air selama periode kering yang lama, akan terbentuk tegangan air pori negatif pada antarmuka antara bagian bawah ponton apung dan permukaan tanah. Tegangan ini menciptakan efek hisap atau efek pelek hidrolik yang kuat. Saat air banjir mulai datang merendam, gaya angkat hidrostatik awal yang dihasilkan oleh air sering kali tidak mampu langsung mengatasi daya hisap tanah tersebut. Akibatnya, terjadi penundaan waktu mengapung (*delayed flotation*).

Ketika volume air banjir terus meningkat dengan cepat sementara bangunan masih tertahan di bawah oleh efek hisap, akan terjadi akumulasi gaya angkat yang sangat besar secara tiba-tiba. Saat daya hisap tanah tersebut akhirnya terlampaui, bangunan akan terangkat ke atas secara mendadak dan tidak terkendali (*sudah terapung mendadak*). Entakan vertikal yang kasar ini dapat menimbulkan gaya kejut dinamis (*dynamic shock load*) yang berisiko merusak sambungan struktural interior atau memutuskan sistem utilitas fleksibel.

Untuk memitigasi bahaya mekanis ini, insinyur sipil modern melengkapi bagian dasar ponton amfibi dengan sistem alur drainase mikro geometris atau memasang sistem katup pelepas tekanan udara (*vacuum-breaker valves*). Katup ini secara otomatis mengalirkan air atau udara bertekanan rendah ke bawah ponton begitu sensor mendeteksi kedatangan air banjir, sehingga memecah kekuatan daya hisap tanah secara instan dan lembut (Archer et al., 2022).

B. Fenomena Kemiringan Tidak Merata (*Differential Tilting*)

Tantangan struktural berikutnya adalah menjaga bangunan tetap berada dalam posisi horizontal sempurna (datar) saat mengapung. Distribusi beban di dalam sebuah rumah atau gedung tidak pernah homogen secara sempurna. Posisi perabotan berat seperti lemari dapur, tangki penyimpanan air, kulkas, serta pergerakan dinamis dari penghuni rumah akan menggeser letak titik pusat gravitasi bangunan menjauh dari titik pusat geometri ponton apung.

Jika perbedaan jarak ini terlalu besar, hantaman arus air banjir akan memicu terjadinya momen guling yang menyebabkan bangunan mengapung dalam kondisi miring (*tilting*). Kemiringan yang melebihi batas toleransi arsitektural beberapa derajat tidak hanya menimbulkan ketidaknyamanan psikologis yang parah bagi penghuni di dalamnya, tetapi juga menciptakan konsentrasi tegangan geser yang berbahaya pada tiang pemandu vertikal, yang dapat menyebabkan tiang tersebut melengkung atau macet terkunci.

Solusi canggih untuk mengatasi masalah kemiringan ini adalah dengan menerapkan sistem kompartementalisasi pintar pada lambung ponton apung. Bagian dalam ponton dibagi menjadi beberapa ruangan atau kompartemen kedap air yang independen. Di dalam kompartemen tersebut dipasang sistem tangki pemberat otomatis (*automated ballast water system*) yang dikendalikan oleh sensor inklinometer digital berbasis mikroprosesor. Begitu sensor mendeteksi adanya kemiringan struktur sebesar fraksi derajat pada

satu sisi, pompa elektronik akan langsung aktif untuk mengalirkan air pemberat ke kompartemen di sisi yang berlawanan, sehingga mengembalikan keseimbangan dan horizontalitas bangunan secara *real-time*.

Struktur Apung Skala Besar (VLFS): Merancang Megacity di Atas Laut

1. Tipologi Rekayasa Lepas Pantai untuk Perkotaan Laut

Ketika ruang daratan di kota-kota pesisir benar-benar telah habis atau tenggelam secara permanen akibat kombinasi kenaikan air laut dan amblesan tanah, strategi akomodasi spasial harus ditingkatkan dari skala bangunan tunggal amfibi menuju skala kawasan perkotaan terapung masif yang permanen di atas permukaan laut. Dalam ranah rekayasa sipil lepas pantai, infrastruktur ini dikenal sebagai *Very Large Floating Structures* (VLFS). VLFS dirancang untuk memiliki dimensi panjang dan lebar yang diukur dalam skala kilometer, mampu menampung superstruktur perkotaan yang kompleks termasuk gedung hunian bertingkat, pusat komersial, taman ruang terbuka hijau, hingga sistem infrastruktur transportasi jalan raya. Berdasarkan karakteristik desain arsitektural dan perilaku hidrodinamika interaksinya dengan gelombang laut, VLFS diklasifikasikan menjadi dua tipologi utama:

A. VLFS Tipe Ponton Masif (*Pontoon-type VLFS*)

VLFS tipe ponton dirancang sebagai sebuah platform pelat datar raksasa yang fleksibel, yang mengapung dan berinteraksi langsung tepat di atas permukaan air laut. Struktur ini memiliki area bidang air yang sangat besar dan draf (bagian lambung yang tenggelam) yang relatif dangkal, biasanya berkisar antara satu hingga tiga meter. Tipe ponton sangat cocok diaplikasikan pada perairan pesisir yang relatif tenang, seperti di dalam kawasan teluk yang terlindungi, lagun, atau wilayah laut yang berada di balik perlindungan dinding pemecah gelombang (*breakwater*).

Keunggulan utama dari VLFS tipe ponton adalah efisiensi biaya konstruksi yang jauh lebih ekonomis, kemudahan proses fabrikasi menggunakan metode galangan kapal modular beton, serta fleksibilitas tata ruang arsitektural yang tidak terbatas di atas permukaan datar pelat platform. Namun, karena pelat ponton ini tipis dan fleksibel jika dibandingkan dengan dimensi panjangnya yang mencapai kilometer, struktur ini sangat rentan terhadap fenomena hidroelastisitas, di mana gelombang laut yang merambat di bawah platform akan menyebabkan pelat tersebut mengalami deformasi elastis bergelombang mengikuti bentuk ombak (*wave-induced elastic deformation*) (Zhang et al., 2024).

B. VLFS Tipe Semi-Submersible (*Semi-Submersible VLFS*)

Untuk kawasan pesisir yang menghadap langsung ke laut lepas dengan paparan energi gelombang laut yang tinggi dan angin badai yang ekstrem, VLFS tipe ponton tidak lagi memadai dari aspek keselamatan struktural. Pilihan harus dialihkan pada tipe *semi-submersible*.

Struktur ini dirancang dengan menempatkan dek platform utama perkotaan berada tinggi di atas permukaan air laut, didukung oleh kolom-kolom vertikal baja atau beton prategang berkaki langsing. Kolom-kolom vertikal ini bertumpu pada ponton-ponton horizontal raksasa yang sepenuhnya tenggelam jauh di bawah permukaan laut, berada di dalam zona air tenang yang tidak lagi dipengaruhi oleh aksi orbital gelombang permukaan.

Dengan meminimalkan luas bidang struktur yang berinteraksi langsung dengan garis pantai dan permukaan gelombang, VLFS tipe *semi-submersible* memiliki stabilitas dinamis yang luar biasa tinggi terhadap gaya anggun (*heave, pitch, roll*) akibat hantaman badai laut lepas. Kelemahan dari tipe ini terletak pada kompleksitas desain struktural mekanis yang sangat tinggi, biaya investasi awal yang mahal, serta keterbatasan kapasitas pemuatan beban statis vertikal yang harus dihitung secara rigid agar tidak mengganggu daya apung global (Ameh et al., 2024).

2. Sistem Penjangkaran Dinamis (*Mooring Systems*) Skala Mega

Salah satu tantangan terbesar teknik sipil dalam merancang sebuah megacity terapung adalah bagaimana menjaga agar pulau buatan raksasa tersebut tetap berada di posisi koordinat geografisnya secara stabil selama kurun waktu ratusan tahun. Tanpa sistem penambat yang andal, gaya seret raksasa yang dihasilkan oleh tiupan angin badai tropis, arus pasang-surut yang deras, dan hantaman gelombang laut akan menghanyutkan seluruh kota terapung menuju laut lepas atau menghempaskannya ke daratan, yang dapat memicu bencana tabrakan katastrofik.

Untuk menahan gaya lateral lingkungan berskala mega tersebut, para insinyur sipil mengintegrasikan beberapa sistem penjangkaran mutakhir:

A. Sistem Tambat Tiang Pancang Lumba-Lumba (*Dolphin Mooring System*)

Sistem ini menggunakan deretan tiang pancang baja raksasa berdiameter beberapa meter yang ditanam menembus lapisan sedimen dasar laut hingga mencapai batuan induk yang kokoh. Struktur VLFS dihubungkan ke tiang lumba-lumba ini melalui mekanisme engsel geser mekanis khusus yang dilengkapi dengan sistem peredam kejut hidrolik (*fender/buffer systems*). Sistem ini sangat kaku dan andal dalam menahan pergerakan horizontal kota apung, namun memberikan kebebasan bergerak vertikal penuh bagi seluruh kawasan perkotaan untuk naik-turun mengikuti siklus pasang-surut air laut harian atau kenaikan air laut global jangka panjang. *Dolphin mooring* merupakan pilihan terbaik untuk VLFS tipe ponton di perairan dangkal pantai (Zhang et al., 2024).

B. Sistem Tambat Tali Katonari Komposit Multitambat (*Catenary Multimoorings System*)

Untuk perairan laut yang lebih dalam di mana pemasangan tiang pancang kaku sudah tidak lagi efisien secara ekonomi dan teknis, teknik sipil lepas pantai menggunakan sistem tali katonari. Kota apung dihubungkan ke jangkar-jangkar raksasa yang tertanam di dasar laut melalui jaringan kabel rantai baja khusus berkekuatan tinggi yang dikombinasikan dengan tali komposit sintetis berbahan polimer canggih (Piątek & Wojnowska-Heciak, 2020).

Kabel-kabel ini sengaja dipasang menggantung membentuk kurva katonari alamiah yang melengkung. Kelengkungan ini memberikan elastisitas hidrodinamika yang sangat baik, bertindak sebagai pegas raksasa yang menyerap dan meredam energi benturan gelombang badai secara bertahap tanpa mentransfer beban kejut tersebut secara langsung ke struktur utama platform kota apung.

C. Sistem Posisi Dinamis Otomatis Berbasis Kecerdasan Buatan (*Dynamic Positioning System - DPS*)

Pada konsep kota apung masa depan berskala global yang berada di laut dalam, sistem penambat fisik konvensional menggunakan tali atau tiang sudah tidak lagi mungkin untuk diaplikasikan. Solusinya adalah dengan mengintegrasikan *Dynamic Positioning System* (DPS) aktif skala mega. Platform VLFS dilengkapi dengan puluhan pod pendorong azimuth bertenaga listrik (*electric azimuth thrusters*) raksasa yang dapat berputar 360 derajat di bawah lambung struktur. Sistem pendorong ini dikendalikan sepenuhnya secara otomatis oleh algoritma Kecerdasan Buatan (AI) yang terhubung dengan satelit GPS militer resolusi tinggi dan sensor meteorologi laut di permukaan (Qiao et al., 2022).

Begitu sensor mendeteksi adanya pergeseran posisi koordinat kota apung sekecil fraksi sentimeter akibat dorongan arus atau angin, komputer AI akan langsung menghitung arah gaya perlawanan yang dibutuhkan dan mengaktifkan pod pendorong tertentu dengan magnitudo daya yang presisi untuk mempertahankan posisi kota tetap diam di koordinat aslinya secara konstan.

Rekayasa Material Maju untuk Infrastruktur Laut Abad ke-21

Membangun sebuah kota atau bangunan di atas lingkungan laut mengharuskan teknik sipil untuk menghadapi musuh alami yang paling destruktif: korosi agresif yang dipicu oleh tingginya konsentrasi ion klorida, penetrasi karbonasi udara laut, dan serangan kimia sulfat air asin. Penggunaan material konstruksi konvensional seperti baja karbon biasa dan beton semen Portland standar tanpa modifikasi akan mengalami proses degradasi struktural, keretakan, dan pembusukan internal dalam kurun waktu kurang dari dua puluh lima tahun, yang dapat memicu kegagalan struktural masif. Oleh karena itu, keberlanjutan masa depan dari arsitektur amfibi dan VLFS sangat bergantung pada inovasi rekayasa material maju berkinerja tinggi.

1. Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) Nano-Komposit

Inovasi material paling krusial dalam struktur sipil terapung modern adalah penerapan *Ultra-High-Performance Concrete* (UHPC) yang diperkuat dengan rekayasa teknologi nano. Berbeda dengan beton konvensional yang memiliki banyak rongga kapiler mikro di dalamnya, UHPC dirancang menggunakan kombinasi semen Portland premium, pasir kuarsa ultra-halus, silika fungsional (*silica fume*), dan penambahan superplasticizer generasi terbaru yang dikombinasikan dengan anyaman serat mikro baja tahan karat atau serat karbon (Liu et al., 2020).

Formula campuran super-padat ini menghasilkan struktur matriks semen yang sangat rapat dengan porositas yang mendekati angka nol persen. Ketidadaan rongga kapiler ini secara absolut memblokir jalur penetrasi ion klorida dari air laut, sehingga mencegah air asin mencapai dan mengorosi tulangan baja di dalam beton. Selain memiliki ketahanan kimiawi yang luar biasa, UHPC memiliki

kekuatan mekanis tekan yang setara dengan baja struktural, mampu menahan beban tekan ekstrem, serta memiliki ketahanan lelah (*fatigue resistance*) yang sangat tinggi terhadap beban siklik dinamis gelombang laut sepanjang umur layan yang diproyeksikan mencapai lebih dari seratus tahun tanpa membutuhkan perawatan fisik yang berarti.

2. Beton Geopolimer Hijau Berbasis Aktivasi Alkali

Untuk mendukung esensi sejati dari resiliensi iklim, infrastruktur arsitektur terapung global tidak boleh dibangun menggunakan material semen Portland konvensional yang proses produksinya menyumbang emisi gas rumah kaca yang besar bagi pemanasan global. Industri konstruksi sirkular beralih memanfaatkan teknologi Beton Geopolimer. Beton geopolimer sepenuhnya meninggalkan penggunaan semen Portland sebagai bahan pengikat (*binder*). Sebagai gantinya, material ini memanfaatkan limbah sisa industri pasca-konsumen yang melimpah, seperti abu terbang (*fly ash*) hasil pembakaran pembangkit listrik tenaga batu bara atau slag tanur tiang blesan (*ground granulated blast-furnace slag*) dari industri peleburan baja (Nguyen & Castel, 2023).

Bahan-bahan kaya silika dan alumina ini diaktivasi secara kimia menggunakan larutan alkali khusus untuk membentuk jaringan polimer anorganik tiga dimensi yang sangat kuat. Penggunaan beton geopolimer tidak hanya mampu mereduksi jejak karbon terwujud (*embodied carbon*) dari proses konstruksi hingga delapan puluh persen, melainkan juga menghasilkan material beton yang memiliki ketahanan alami yang jauh lebih superior terhadap korosi asam, sulfat, dan paparan air laut yang agresif jika dibandingkan dengan beton semen konvensional.

3. Komposit Polimer Serat Komposit (*Fiber Reinforced Polymers - FRP*)

Pada komponen bangunan terapung yang membutuhkan karakteristik material yang ringan namun memiliki kekuatan mekanis tarik yang tinggi, material logam konvensional digantikan oleh penggunaan komposit polimer serat (*Fiber Reinforced Polymers - FRP*). FRP dibuat dengan menyematkan anyaman serat berkekuatan tinggi, seperti serat karbon (*Carbon FRP*) atau serat kaca (*Glass FRP*) ke dalam matriks resin polimer epoksi yang tangguh (Diniță et al., 2023).

Material FRP memiliki keunggulan berat jenis yang sangat ringan, hanya sepertiga dari berat baja struktural, namun memiliki kekuatan tarik yang melampaui baja kualitas tinggi. Karakteristik ringan ini sangat menguntungkan untuk rekayasa struktur apung karena secara signifikan mereduksi beban mati superstruktur bangunan di atas platform, yang secara otomatis meningkatkan kapasitas daya apung bersih (*net buoyancy*) dan efisiensi ruang ponton bawah laut. Yang paling utama, material komposit FRP memiliki ketebalan absolut secara kimiawi terhadap korosi air laut, tidak memerlukan pengecatan anti-karat berkala, bebas dari serangan karat galvanis, dan memiliki umur layan operasional yang tidak terbatas di lingkungan laut yang paling ekstrem.

Urbanisme Laut (Marine Urbanism): Integrasi Estetika, Sosial, dan Ekologi

1. Konsep Tata Ruang Berbasis Metabolisme Sirkular Tertutup

Perancangan sebuah kota terapung di atas laut (VLFS) tidak boleh sekadar memindahkan paradigma tata ruang daratan konvensional yang polutif dan ekstraktif menuju permukaan laut. Kehadiran peradaban baru di atas air harus mengadopsi konsep Urbanisme Laut (*Marine Urbanism*) yang berlandaskan pada prinsip metabolisme sirkular tertutup (*closed-loop urban metabolism*). Kota terapung dirancang sebagai sebuah organisme ekologis mandiri yang mandiri, di mana setiap limbah yang dihasilkan oleh satu sistem harus diubah menjadi sumber daya berharga bagi sistem fungsional lainnya (Ragazou et al., 2024).

Dalam hal pemenuhan energi, megacity terapung sepenuhnya meninggalkan ketergantungan pada bahan bakar fosil. Seluruh pasokan listrik diproduksi secara mandiri di atas platform melalui integrasi berbagai teknologi energi terbarukan laut terpadu:

- a. Fasad Arsitektur Sel Surya Transparan: Seluruh permukaan kaca jendela gedung bertingkat di atas VLFS menggunakan teknologi sel surya transparan yang menangkap energi foton matahari tanpa mengorbankan pencahayaan alami interior dan estetika visual bangunan.

- b. Sistem Turbin Angin Lepas Pantai Terintegrasi: Bagian tepi platform VLFS dilengkapi dengan deretan turbin angin sumbu vertikal (*Vertical Axis Wind Turbines*) yang senantiasa menangkap energi angin laut yang berembus kencang secara konstan tanpa menimbulkan polusi suara.

c. Sistem Konversi Energi Termal Laut (*Ocean Thermal Energy Conversion - OTEC*): Memanfaatkan perbedaan suhu air antara permukaan laut yang hangat dan lapisan air laut dalam yang dingin di bawah platform VLFS untuk menggerakkan siklus generator fluida, menghasilkan pasokan listrik beban dasar (*baseload*) yang stabil sepanjang hari tanpa dipengaruhi oleh kondisi cuaca.

Sistem manajemen pengelolaan air bersih mengandalkan kombinasi pemanenan air hujan global yang terintegrasi pada atap-atap gedung jalurnya dialirkan menuju tangki penyimpanan utama di dalam lambung platform, yang dikombinasikan dengan instalasi desalinasi air laut berbasis membran osmosis balik (*Reverse Osmosis*) bertenaga energi mandiri dari sistem OTEC (Zheng et al., 2022).

Seluruh limbah cair domestik (air abu-abu dan air hitam) tidak boleh dibuang begitu saja ke ekosistem laut sekitarnya. Air limbah diproses secara rigid melalui instalasi pengolahan canggih berbasis bioreaktor membran tingkat lanjut (*Advanced Membrane Bioreactors*). Proses ini menghasilkan air daur ulang dengan tingkat kemurnian tinggi yang kaya akan kandungan nutrisi organik fosfat dan nitrogen. Air kaya nutrisi ini dialirkan menuju sistem pertanian hidroponik vertikal perkotaan dan fasilitas akuaponik integratif yang dirancang di dalam ruang-ruang komunal antar gedung. Langkah ini sekaligus mengamankan kemandirian pasokan pangan segar bagi seluruh penduduk kota apung tanpa memerlukan pasokan logistik dari daratan.

2. Ekologi Bawah Air dan Teknologi BioRock Aktif

Sektor arsitektur perkotaan laut modern menolak asumsi bahwa kehadiran struktur buatan manusia akan selalu merusak alam. Melalui perencanaan arsitektur laut yang bijaksana, keberadaan platform terapung VLFS justru dimanfaatkan secara aktif untuk memulihkan dan meningkatkan kualitas kesehatan ekosistem laut bawah air yang telah mengalami kerusakan parah akibat pemanasan global dan penangkapan ikan berlebihan (Paxton et al., 2025).

Bagian bawah lambung dari platform beton UHPC dan sistem penambatan jala bawah laut dirancang dengan mengintegrasikan teknologi BioRock aktif. Sistem ini bekerja dengan cara mengalirkan arus listrik searah tegangan sangat rendah yang aman bagi makhluk hidup menembus struktur rangka logam konvensional yang dipasang di bawah laut. Arus listrik ini memicu reaksi elektrokimia pengendapan elektrolisis air laut yang unik, yang merangsang ion kalsium dan magnesium terlarut di dalam air asin untuk mengristal dan mengendap di permukaan rangka baja struktural bawah laut, membentuk lapisan pelindung kapur alami kalsium karbonat yang keras dan tebal yang mirip dengan komposisi geologis terumbu karang alami.

Lapisan kapur *BioRock* ini bertindak sebagai media pertumbuhan yang luar biasa subur bagi koloni karang hidup, lamun, dan mikroalga laut. Keberadaan aliran listrik tegangan rendah terbukti secara ilmiah mampu mempercepat laju pertumbuhan karang hingga tiga hingga empat kali lipat lebih cepat daripada pertumbuhan normal di alam bebas, serta meningkatkan tingkat resiliensi karang terhadap fenomena pemutihan karang akibat kenaikan suhu air laut global.

Dalam hitungan tahun, bagian bawah kota terapung akan bermutasi fungsi menjadi kawasan hutan terumbu karang buatan berskala mega (*mega artificial coral reefs ecosystem*) yang mengundang kedatangan ribuan spesies ikan laut, moluska, dan krustasea untuk memulihkan keanekaragaman hayati pantai, menjadikan kota terapung sebagai oasis restorasi ekologi laut dunia.

Studi Kasus Global dan Analisis Kelayakan Praktis

1. Evaluasi Proyek Pionir Komersial

Implementasi dari filsafat arsitektur amfibi dan struktur apung skala besar bukan lagi sekadar visualisasi konsep fiksi ilmiah yang berada di atas kertas seminar teoretis. Di berbagai belahan dunia, proyek-proyek perintis skala komersial telah mulai dikonstruksi dan divalidasi kinerjanya secara empiris.

Salah satu studi kasus paling menonjol di tingkat dunia adalah proyek Oceanix Busan di Korea Selatan. Proyek ini merupakan hasil kolaborasi strategis antara perusahaan teknologi Oceanix, biro arsitek internasional Bjarke Ingels Group (BIG), dan badan dunia PBB UN-Habitat. Proyek ini merancang sebuah prototipe komunitas perkotaan terapung modular pertama di dunia yang terintegrasi langsung dengan kota pesisir Busan. Proyek ini menggunakan sistem platform terapung tipe ponton masif berbahan beton komposit modular berperforma tinggi yang dihubungkan ke daratan melalui jembatan penghubung dinamis fleksibel (*linkspans*) (Gorzka et al., 2026).

Seluruh platform dilengkapi dengan sistem kemandirian energi matahari, pengolahan air sirkular mandiri, dan teknologi *BioRock* pada bagian bawah lambungnya. Keberhasilan fase pertama dari proyek *Oceanix Busan* menjadi bukti empiris tak terbantahkan bahwa VLFS komersial aman secara regulasi, layak secara teknis rekayasa, dan diminati oleh pasar properti modern sebagai model investasi hijau masa depan.

2. Proyeksi Penerapan Integratif di Kawasan Metropolitan Pesisir Asia Tenggara

Bagi kawasan metropolitan di Asia Tenggara yang mengalami krisis ganda banjir rob dan penurunan muka tanah yang parah seperti kawasan pesisir Teluk Jakarta atau Teluk Bangkok penerapan teknologi arsitektur terapung dan amfibi memberikan alternatif solusi yang jauh lebih humanis, inklusif, dan adaptif dibandingkan pembangunan proyek tanggul laut kaku konvensional yang sering kali mengusur komunitas lokal (Buka et al., 2026).

Melalui pendekatan urbanisme laut integratif, kawasan permukiman kumuh nelayan tradisional di sepanjang garis pantai yang rentan tenggelam tidak perlu digusur secara destruktif ke rusunawa darat yang jauh dari akses laut tempat mereka bekerja mencari ikan. Kawasan tersebut dapat direkonstruksi secara bertahap menggunakan cetak biru Kluster Perumahan Amfibi dan Komunitas Terapung Modular. Rumah-rumah nelayan dirancang ulang menggunakan teknologi fondasi ponton amfibi ringan berbasis material lokal, sehingga saat air pasang rob masuk, seluruh perkampungan nelayan akan terangkat dengan aman secara kolektif tanpa merusak harta benda mereka.

Kawasan perairan teluk di sekitarnya diintegrasikan dengan modul platform terapung VLFS tipe ponton yang berfungsi sebagai pusat fasilitas sosial komunal, ruang terbuka hijau, sekolah, puskesmas apung, hingga pasar ikan modern terapung. Langkah ini tidak hanya memberikan perlindungan hidrolis yang absolut bagi masyarakat pesisir terhadap ancaman perubahan iklim, melainkan juga menaikkan harkat hidup, memulihkan ekonomi lokal, dan menjaga keberlanjutan tradisi budaya maritim masyarakat tanpa merusak keseimbangan aliran hidrologis pesisir pantai.

Tantangan Implementasi: Finansial, Regulasi, dan Psikologi Publik

Meskipun keunggulan ilmiah, keamanan mekanis rekayasa sipil, dan keindahan arsitektural dari sistem terapung telah terbukti secara mutlak melalui berbagai simulasi numerik dan proyek perintis, transisi peradaban menuju urbanisme laut dalam skala massal masih membentur dinding tantangan non-teknis yang sangat kompleks di lapangan.

1. Tantangan Finansial dan Analisis Biaya Siklus Hidup

Hambatan utama yang sering kali membuat para pengembang real estat konvensional dan lembaga keuangan enggan beralih ke struktur terapung atau amfibi adalah tingginya nilai biaya kapital investasi awal (*Capital Expenditure* - CAPEX). Proses manufaktur platform VLFS menggunakan material canggih seperti beton UHPC nano-komposit, baja tahan karat berkualitas tinggi, sistem penjangkaran hidrolik otomatis, serta instalasi utilitas fleksibel berspesifikasi tinggi membutuhkan biaya produksi awal per meter persegi yang lebih mahal berkisar tiga puluh lima hingga lima puluh persen jika dibandingkan dengan biaya pembangunan struktur gedung berbasis darat konvensional di atas tanah biasa (Wahyu et al., 2022).

Namun, ketakutan finansial ini sebenarnya terjadi akibat kesalahan pola pikir analisis keuangan tradisional yang hanya menghitung keuntungan jangka pendek tanpa memperhitungkan biaya jangka panjang secara menyeluruh. Jika analisis investasi dievaluasi menggunakan metode *Life Cycle Costing* (LCC) dengan rentang waktu proyeksi lima puluh hingga seratus tahun ke depan, arsitektur terapung terbukti memiliki efisiensi ekonomi yang jauh lebih unggul.

Pada bangunan darat di pesisir yang terus mengalami penurunan tanah, nilai pengeluaran biaya operasional pemeliharaan (*Operational Expenditure* - OPEX) akan membengkak secara eksponensial untuk mendanai proses perbaikan fondasi yang amblas, peninggian lantai bangunan secara berkala, penggantian utilitas yang rusak akibat korosi air asin, hingga kerugian finansial total jika bangunan tersebut akhirnya tenggelam secara permanen.

Sebaliknya, pada bangunan amfibi dan VLFS, nilai biaya pemeliharaan operasional sangat rendah karena material maju yang digunakan memiliki ketahanan alami terhadap air laut, serta struktur bangunan terbebas dari risiko kerusakan akibat banjir dan amblesan tanah secara absolut, sehingga nilai sisa ekonomi aset properti (*Residual Value*) tetap terjaga sangat tinggi sepanjang waktu.

2. Kekosongan Regulasi Hukum dan Kode Bangunan Apung (*Floating Building Codes*)

Hambatan berikutnya yang tidak kalah krusial adalah ketiadaan kerangka regulasi hukum, aspek legalitas sertifikasi tanah, dan kode bangunan resmi (*Building Codes*) yang mengatur tata cara perancangan dan perizinan struktur bangunan terapung di tingkat nasional maupun internasional. Seluruh instrumen hukum regulasi perizinan mendirikan bangunan (seperti IMB/PBG di Indonesia) dan standardisasi keamanan rekayasa struktur sipil yang berlaku saat ini dirancang dengan asumsi dasar absolut bahwa sebuah bangunan yang sah haruslah berdiri secara kaku menancap secara permanen di atas permukaan tanah kering yang memiliki status sertifikat hak kepemilikan tanah yang jelas (seperti Hak Milik atau Hak Guna Bangunan) (Nabilla, 2024).

Ketika seorang investor atau arsitek mengajukan izin untuk membangun sebuah kompleks bangunan komersial terapung permanen di atas permukaan air laut, otoritas birokrasi pemerintahan sering kali mengalami kebingungan hukum dalam menentukan kementerian atau dinas mana yang berwenang memberikan izin, bagaimana cara mengukur batas kepemilikan koordinat ruang air yang dinamis, serta standar SNI mana yang harus digunakan untuk menguji kelayakan fungsi struktural dari sebuah bangunan yang bergerak naik-turun.

Akselerasi transisi menuju arsitektur sirkular terapung membutuhkan komitmen politik yang kuat dari regulator pemerintahan untuk segera menyusun dan mengesahkan regulasi hukum khusus tata ruang laut perkotaan, serta merumuskan kode bangunan apung nasional (*National Floating Building Codes*) yang mengadopsi standar rekayasa maritim internasional.

3. Resistensi Psikologis Publik dan Paradigma Terrestrial

Hambatan terdalam yang bersifat sosiologis-antropologis adalah adanya resistensi psikologis dari mayoritas populasi manusia modern yang telah terkondisikan selama ribuan tahun sejarah peradaban untuk menganggap tanah padat terrestrial sebagai satu-satunya ruang hidup yang aman, stabil, dan dapat diprediksi untuk membangun kehidupan permanen. Berada di dalam sebuah ruangan bangunan yang mengapung di atas air sering kali memicu persepsi kepalsuan rasa takut akan risiko tenggelam, mabuk laut akibat ayunan gelombang, atau ketidakstabilan posisi jika terjadi badai besar (Mirza Fuady, 2025).

Mengubah paradigma berpikir masyarakat dari pola pikir terrestrial kaku menuju pola pikir maritim dinamis membutuhkan waktu edukasi publik yang konsisten, serta diseminasi bukti-bukti empiris dari keberhasilan operasional berbagai proyek perintis terapung dunia. Ketika masyarakat mulai melihat dan merasakan sendiri pengalaman langsung berada di dalam gedung arsitektur amfibi atau platform VLFS yang terasa sangat kokoh, stabil, nyaman, dan sepenuhnya aman dari bencana banjir rob yang merendam daratan di sekitar mereka, ketakutan psikologis tersebut akan luruh secara alamiah, digantikan oleh kesadaran baru bahwa masa depan peradaban manusia tidak lagi berada di daratan yang kalah melawan air, melainkan hidup berdampingan secara harmonis di atas permukaan air.

KESIMPULAN DAN PETA JALAN STRATEGIS MENUJU ABAD URBANISME LAUT

Ancaman tenggelamnya kota-kota pesisir global akibat konvergensi kenaikan permukaan air laut absolut dan laju amblesan tanah antropogenik yang masif bukanlah sebuah prediksi distopia masa depan yang jauh, melainkan sebuah realitas empiris krisis ruang spasial paling mendesak yang sedang dihadapi oleh peradaban manusia saat ini. Pendekatan rekayasa sipil konvensional yang mengandalkan pembangunan infrastruktur pertahanan kaku (*hard-engineered*) terbukti telah mencapai batas fisik, finansial, dan ekologisnya, serta tidak lagi memadai untuk menjamin keselamatan keberlanjutan kota-kota metropolitan pesisir jangka panjang.

Arsitektur Amfibi dan Struktur Apung Skala Besar (VLFS) menawarkan sebuah lompatan paradigma rekayasa dan desain yang radikal, ilmiah, sirkular, dan sepenuhnya komprehensif. Dengan mendefinisikan hubungan antara lingkungan binaan manusia dan dinamika hidrologis alam pantai, kedua teknologi ini membuktikan bahwa air tidak harus dipandang sebagai musuh destruktif yang harus diperangi secara frontal menggunakan dinding beton masif, melainkan dapat dirangkul sebagai sekutu ruang hidup baru yang menawarkan resiliensi, fleksibilitas arsitektural, dan restorasi ekologis bawah air yang luar biasa kaya melalui teknologi seperti *BioRock*. Sinergi lintas disiplin yang harmonis antara kekuatan struktural rekayasa sipil hidrodinamika material maju dan estetika fungsionalitas arsitektur adaptif menjadi kunci utama dari keberhasilan transisi peradaban ini.

Untuk mengompilasi seluruh temuan ilmiah makalah ini menjadi sebuah panduan implementasi nyata bagi para pemangku kebijakan, arsitek, dan insinyur sipil di tingkat global, kami merumuskan sebuah Peta Jalan Strategis Tiga Tahap menuju perwujudan Abad Perkotaan Laut yang berkelanjutan:

1. Tahap Pertama: Transisi Regulasi dan Proyek Perintisan (Jangka Pendek: Satu hingga Tiga Tahun)

- Amandemen Kode Bangunan Nasional dan Standardisasi Sipil: Pemerintah di negara-negara pesisir rentan harus segera menyusun naskah akademik dan mengesahkan regulasi *National Floating Building Codes* yang memberikan kepastian hukum perizinan, kelaikan struktur, dan status hak pemanfaatan ruang air bagi bangunan amfibi dan terapung.
- Insentif Fiskal Hijau untuk Pengembang Swasta: Memberikan insentif pemotongan pajak bumi dan bangunan, kemudahan birokrasi perizinan, atau skema pendanaan bunga rendah bagi para pengembang properti real estat yang berkomitmen menerapkan metodologi DfD, penggunaan material UHPC geopolimer, dan sertifikasi Paspor Material pada proyek pesisir mereka.
- Konstruksi Infrastruktur Publik Apung Skala Kecil: Mengawasi implementasi praktis dengan membangun fasilitas publik terapung skala kecil di area pesisir terdampak parah, seperti sekolah apung, puskesmas apung, kantor polisi pantai amfibi, atau ruang terbuka hijau terapung untuk menguji kinerja teknis sekaligus mendedukasi psikologi publik.

2. Tahap Kedua: Integrasi Rantai Pasok dan Skalabilitas Modular (Jangka Menengah: Lima hingga Tujuh Tahun)

- Standardisasi Dimensi Komponen Modular Dunia: Membangun konsorsium industri lintas disiplin untuk menetapkan standardisasi dimensi geometris komponen platform VLFS dan sistem utilitas fleksibel, guna menciptakan efisiensi produksi massal pabrikan (*off-site prefabrication*) dan menurunkan nilai CAPEX awal struktur terapung di pasar komersial global.
- Pembangunan Hub Logistik dan Galangan Konstruksi Sirkular: Membuka kawasan galangan khusus di dekat pelabuhan utama kota pesisir yang berfungsi sebagai pusat perakitan platform beton terapung, penyimpanan material maju, dan pemeliharaan teknologi penjangkaran dinamis.
- Implementasi Paspor Material Berbasis Blockchain secara Mandat: Mewajibkan seluruh proyek infrastruktur pantai untuk mendaftarkan identitas digital komponen material mereka ke dalam sistem *Material Passports* terenkripsi guna menjamin transparansi informasi daur ulang pada akhir masa pakai gedung.

3. Tahap Ketiga: Realisasi Megacity Terapung dan Restorasi Biosfer Global (Jangka Panjang: Sepuluh Tahun ke Atas)

- Koneksi Kluster VLFS Perkotaan Laut Mandiri: Menghubungkan berbagai modul platform terapung yang telah divalidasi kinerjanya menjadi satu kesatuan sistem jaringan *Megacity Terapung* yang mandiri secara energi surya-termal laut, mandiri pasokan air bersih desalinasi sirkular, dan mandiri kedaulatan pangan akuaponik vertikal.
- Otomasi Dekonstruksi dan Konstruksi Lapangan Berbasis AI: Mengintegrasikan robotika otonom dan algoritma kecerdasan buatan untuk mengelola siklus pemeliharaan struktur, pelepasan komponen pasang-bongkar yang aman, serta pengaturan posisi jangkar dinamis kota secara otomatis sepanjang waktu.
- Transformasi Pesisir Menuju Oasis Restorasi Ekologi: Menghentikan total proyek reklamasi pasir konvensional dan mengalihkan seluruh ekspansi spasial kota ke atas air VLFS, menjadikan bagian bawah permukaan kota apung berskala besar sebagai pusat pemulihan hutan terumbu karang *BioRock* dunia, yang mengabsorpsi emisi karbon dioksida atmosfer secara masif dan mengembalikan keseimbangan keanekaragaman hayati biosfer bumi pertiwi.

Melalui komitmen peta jalan strategis yang konsisten, terukur, dan berbasis ilmiah lintas disiplin ini, peradaban manusia tidak perlu lagi memandang masa depan perubahan iklim dengan keputusan distopia ketakutan akan kehilangan kota-kota peradaban sejarah mereka yang tenggelam di bawah air laut. Kita dapat menyongsong fajar baru sebuah Abad Urbanisme Laut dengan penuh rasa optimisme, sebuah era di mana arsitektur dan rekayasa teknik sipil tidak lagi bekerja merusak alam, melainkan lahir kembali berdiri teguh, mengapung anggun dengan penuh harmoni estetika memeluk dinamika air, demi menjaga keberlanjutan kehidupan generasi masa depan manusia di atas planet Bumi.

REFERENCES

- Ameh, H., Badarnah, L., & Lamond, J. (2024). Amphibious Architecture: A Biomimetic Design Approach to Flood Resilience. *Sustainability*, 12(3), 1069. <https://doi.org/10.3390/su16031069>
- Archer, R., Choi, H., Vasconez, R., Najm, H., & Gong, J. (2022). Adaptive coastal construction: designing amphibious homes to resist hurricane winds and storm surges. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 9, 273–290. <https://doi.org/10.1007/s40722-022-00267-6>
- Buka, O., Jutan, Y., Kaseside, M., Maatoke, C. D., Gisisi, D. E., Lawene, M. N., Lelerang, V., Lesnussa, T. P., Totoda, L. J., & Melmambessy, E. H. P. (2026). *Strategi mitigasi bencana dan adaptasi perubahan iklim global berbasis sains dan masyarakat di wilayah pesisir dan kepulauan*. Kamiya Jaya Aquatic.
- Diniță, A., Rîpeanu, R., Ilincă, C., Cursaru, D., Matei, D., Naim, R. I., Tănase, M., & Portoacă, A. (2023). Advancements in Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Comprehensive Analysis. *Polymers*, 16. <https://doi.org/10.3390/polym16010002>
- Dung, D. T. M., Hung, V. H., Khai, L. T. Q., Khanh, C. Q., Hai, T. X., & Van Thuyet, N. (2026). Design guide for ferrocement floating pontoons for flood-adapted housing in the Mekong Delta. *Journal of Materials & Construction*, 16(01). <https://doi.org/10.54772/jomc.v16i01.1242>
- Gorzka, J., Burda, I., & Nyka, L. (2026). Hydro-Adaptive Housing for Flood-Resilient Planning: Elevated, Amphibious and Floating Solutions. *Buildings*, 16(10), 1880. <https://doi.org/10.3390/buildings16101880>
- Griggs, G., & Reguero, B. (2021). Coastal Adaptation to Climate Change and Sea-Level Rise. *Water*, 13(16), 2151. <https://doi.org/10.3390/w13162151>
- Jiang, C., Xu, P., Bai, X., Zhao, Z., Moctar, E., & Zhang, G. (2023). A review of advances in modeling hydrodynamics and hydroelasticity for very large floating structures. *Ocean Engineering*, 285(1). <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115319>
- Liang, B., Shi, G., Wu, Y., Zhu, Y., Wang, M., & Sun, Z. (2026). Assessment of the compound impact of sea level rise, land subsidence and storm surge under climate change in ShangHai. *PLOS One*, 21(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0343974>
- Liu, C., He, X., Deng, X., Wu, Y., Zheng, Z., Liu, J., & Hui, D. (2020). Application of nanomaterials in ultra-high performance concrete: A review. *Nanotechnology Reviews*, 9, 1427–1444. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0107>
- Mirza Fuady, S. T. (2025). *Integrasi Arsitektur, Sosial dan Lingkungan dalam Desain Kota Tangguh*. USK Press.
- Nabilla, A. (2024). Kerangka Hukum Nasional dalam Menghadapi Perubahan Iklim: Tantangan dan Arah Pembaruan. *Jurnal Masyarakat Dan Budaya*, 14(3), 403–438.
- Nguyen, Q. D., & Castel, A. (2023). Developing Geopolymer Concrete by Using Ferronickel Slag and Ground-Granulated Blast-Furnace Slag. *Ceramics*, 6(3), 1861–1878. <https://doi.org/10.3390/ceramics6030114>
- Nicholls, R., Lincke, D., Hinkel, J., Brown, S., Vafeidis, A., Meyssignac, B., Hanson, S., Merkens, J. -L., & Fang, J. (2021). A global analysis of subsidence, relative sea-level change and coastal flood exposure. *Nature Climate Change*, 11, 338–342. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00993-z>
- Nijah Akram, Ar. Mohsin Iqbal Deo, Muti ul Haq, Ar. Saud Kamal, & Ahsan Khalil. (2026). Exploring Tidal Architecture: Amphibious Building Systems for Coastal Communities in Flux. *Social Science Review Archives*, 4(1 SE-Articles), 1357–1364. <https://doi.org/10.70670/sra.v4i1.1652>
- Paxton, A., Runde, B., Smith, C., Lester, S., Vozzo, M., Saunders, M., Steward, D., Lemoine, H., Valdez, S., Gittman, R., Narayan, S., Allgeier, J., Morris, R., Nowacek, D., Seaman, W., Halpin, P., Angelini, C., & Silliman, B. (2025). Leveraging built marine structures to benefit and minimize impacts on natural habitats. *BioScience*, 75(2), 172–183. <https://doi.org/10.1093/biosci/biae135>
- Piątek, L., & Wojnowska-Heciak, M. (2020). Multicase Study Comparison of Different Types of Flood-Resilient Buildings (Elevated, Amphibious, and Floating) at the Vistula River in Warsaw, Poland. *Sustainability*, 12(22), 9725. <https://doi.org/10.3390/su12229725>
- Qiao, Y., Yin, J., Wang, W., Duarte, F., Yang, J., & Ratti, C. (2022). Survey of Deep Learning for Autonomous Surface Vehicles in Marine Environments. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24, 3678–3701. <https://doi.org/10.1109/tits.2023.3235911>
- Ragazou, K., Zournatzidou, G., Sklavos, G., & Sariannidis, N. (2024). Integration of Circular Economy

- and Urban Metabolism for a Resilient Waste-Based Sustainable Urban Environment. *Urban Science*, 8(4), 175. <https://doi.org/10.3390/urbansci8040175>
- Sankalp, A., & Leeneer, Y. De. (2019). Mooring Systems for Very Large Floating Structures. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 41. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8743-2_14
- Wahyu, H. M. H., Drastiani, R., & Ulfa, A. (2022). Identifikasi Site Strategis Arsitektur Amfibi di Area Rawan Banjir Palembang, Indonesia. *Archvisual: Jurnal Arsitektur Dan Perencanaan*, 1(2), 109–116.
- Wu, G., Liu, Q., Xu, H., & Wang, J. (2024). Modelling the combined impact of sea level rise, land subsidence, and tropical cyclones in compound flooding of coastal cities. *Ocean & Coastal Management*, 21(3). <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107107>
- Ye, J., Zhou, H., & He, K. (2024). A generalized framework of two-way coupled numerical model for fluid-structure-seabed interaction (FSSI): Explicit algorithm. *Engineering Geology*, 340. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107679>
- Zhang, H., Cao, X., & Zhang, N. (2024). Hydrodynamic analysis of a novel box-type floating marine airport. *Ocean Engineering*, 298. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117206>
- Zheng, Y., Lu, H., Li, J., Wang, S., Wang, C., Wu, Z., Shen, Y., & Liu, X. (2022). A Novel Ocean Thermal Energy Driven System for Sustainable Power and Fresh Water Supply. *Membranes*, 12. <https://doi.org/10.3390/membranes12020160>