

Air dan Akar Mangrove



INFRASTRUKTUR ALAMI UNTUK
MASA DEPAN KETAHANAN PESISIR



Water
filtration



Biodiversity



Coastal
protection



Climate
adaptation

Dr. Bokiraiya Latuamury, M.Sc.

Air dan Akar Mangrove

INFRASTRUKTUR ALAMI UNTUK
MASA DEPAN KETAHANAN WILAYAH PESISIR

Dr. Bokiraiya Latuamury, M.Sc.

**AIR DAN AKAR *MANGROVE*:
INFRASTRUKTUR ALAMI UNTUK MASA DEPAN KETAHANAN WILAYAH PESISIR**

Penulis:
Dr. Bokiraiya Latuamury, M.Sc.

Desain Cover:
Septian Maulana

Sumber Ilustrasi:
www.freepik.com

Tata Letak:
Handarini Rohana

Editor:
N. Rismawati

ISBN:
978-634-246-038-2

Cetakan Pertama:
Juni, 2025

Hak Cipta Dilindungi Oleh Undang-Undang
by Penerbit Widina Media Utama

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit.

PENERBIT:
WIDINA MEDIA UTAMA
Komplek Puri Melia Asri Blok C3 No. 17 Desa Bojong Emas
Kec. Solokan Jeruk Kabupaten Bandung, Provinsi Jawa Barat

Anggota IKAPI No. 519/JBA/2025
Website: www.penerbitwidina.com
Instagram: @penerbitwidina
Telepon (022) 87355370

KATA PENGANTAR

Perubahan iklim global telah memicu krisis multidimensional yang secara langsung mengancam keberlanjutan wilayah pesisir, terutama dalam konteks ketersediaan air bersih dan perlindungan terhadap bencana hidrometeorologi. Dalam menghadapi tantangan tersebut, diperlukan pendekatan yang tidak hanya teknis dan struktural, tetapi juga berbasis ekosistem. Judul buku *Air dan Akar Mangrove: Infrastruktur Alami untuk Masa Depan Ketahanan Pesisir* mencerminkan pendekatan transdisipliner yang menggabungkan sains, kebijakan, teknologi, dan kearifan lokal. Akar *mangrove*, yang selama ini dipahami sekadar sebagai komponen biologis penopang vegetasi, dalam buku ini dikaji secara lebih dalam sebagai sistem biohidrologis kompleks yang mampu menyaring air, menstabilkan sedimen, mengatur aliran air tanah, dan menjadi *buffer* alami terhadap salinisasi serta banjir rob.

Kehadiran buku ini bukan hanya sebagai produk akademik, melainkan sebagai kontribusi strategis terhadap pengembangan *nature-based solutions* (NbS) dalam perencanaan infrastruktur. Buku ini menawarkan model-model inovatif yang dapat diadopsi oleh pembuat kebijakan, perencana tata ruang, insinyur lingkungan, dan masyarakat sipil dalam memperkuat ketahanan air wilayah pesisir. Isi buku ini disusun secara sistematis dan progresif dalam sepuluh bab utama, yang mencakup konsep dasar biohidrologi *mangrove*, transisi infrastruktur dari abu-abu ke hijau-biru, hingga pendekatan etnohidrologi dan tata kelola adaptif. Pendekatan interdisipliner menjadi landasan utama dalam penyusunan buku ini. Kontribusi pemikiran dari berbagai bidang seperti geosains, teknik sipil, kebijakan publik, ekologi tropis, hingga antropologi lingkungan memperkaya narasi dan memperkuat argumentasi ilmiah bahwa sistem akar *mangrove* dapat dijadikan prototipe *eco-smart infrastructure* masa depan.

Kelebihan utama dari buku ini adalah *novelty*-nya dalam menempatkan akar *mangrove* sebagai aktor utama dalam infrastruktur hijau-biru, bukan sekadar pelengkap vegetasi pesisir. Dengan menyajikan indeks efisiensi biohidrologi, model filtrasi berbasis akar, dan pendekatan spasial dalam restorasi, buku ini menawarkan alat bantu ilmiah dan praktis untuk pengambil keputusan. Visualisasi ini bertujuan untuk menjembatani pemahaman lintas sektor dan memfasilitasi replikasi solusi secara spasial di berbagai konteks geografis. Dalam konteks Indonesia, buku ini diharapkan menjadi referensi penting dalam mendukung implementasi Peraturan Presiden tentang Infrastruktur Hijau, dokumen RZWP3K, serta upaya restorasi *mangrove* nasional yang diarusutamakan dalam program mitigasi dan adaptasi iklim. Secara global, buku ini selaras dengan agenda SDGs, Paris Agreement, dan IPCC AR6.

Kami menyadari bahwa tantangan pengelolaan wilayah pesisir tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga politis dan sosial-ekologis. Oleh karena itu, buku ini juga mengangkat dimensi partisipasi masyarakat, pengetahuan lokal, dan diplomasi lingkungan sebagai bagian integral dari tata kelola adaptif yang berkelanjutan. Akhir kata, semoga buku ini dapat menjadi kontribusi yang berarti bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan praktik keberlanjutan di kawasan pesisir. Kami mengundang para akademisi, praktisi, pengambil kebijakan, serta komunitas lokal untuk menjadikan buku ini sebagai sumber inspirasi dan refleksi kritis dalam memperkuat ketahanan air berbasis akar *mangrove*—sebuah fondasi alami yang cerdas dan tangguh untuk masa depan.

Ambon, 25 Mei 2025

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
BAB 1 PENDAHULUAN: AIR, PESISIR, DAN PERUBAHAN IKLIM	1
A. Konteks Global Krisis Air dan Perubahan Iklim	1
B. Wilayah Pesisir sebagai Zona Rentan dan Strategis	8
C. Tantangan Infrastruktur Konvensional dalam Pengelolaan Air Pesisir	20
D. Menuju Paradigma Infrastruktur Alami (<i>Nature-Based Solutions</i>)	23
E. <i>Mangrove</i> sebagai Pilar Infrastruktur Alami Pesisir	26
F. Kecerdasan Ekologis Akar <i>Mangrove</i> dalam Konteks Biohidrologi	29
G. Relevansi Akar <i>Mangrove</i> dalam Ketahanan Air Pesisir	31
H. Pengetahuan Lokal dan Praktik Tradisional tentang Akar <i>Mangrove</i>	34
I. Peta Jalan Penelitian dan Kebijakan: Menempatkan Akar dalam Perencanaan Strategis	37
J. Tujuan dan Struktur Buku	42
BAB 2 INFRASTRUKTUR ALAMI DAN TRANSISI DARI REKAYASA ABU-ABU KE HIJAU-BIRU	45
A. Evolusi Pemikiran Infrastruktur Air: dari <i>Hard Engineering</i> ke Pendekatan Ekologis	45
B. Definisi dan Kategori Infrastruktur: <i>Grey</i> , <i>Green</i> , dan <i>Blue</i>	47
C. Infrastruktur Abu-abu: Fungsi, Kelebihan, dan Keterbatasannya	50
D. Infrastruktur Hijau-Biru: Prinsip Desain Berbasis Ekosistem	61
E. Akar <i>Mangrove</i> sebagai Komponen Infrastruktur Hijau-Biru	66
F. Perbandingan Kinerja Hidrologis: Akar <i>Mangrove</i> vs <i>Biofilter</i> Buatan	73
G. Efisiensi Ekonomi Infrastruktur Alami Berbasis <i>Mangrove</i>	76
H. Integrasi Infrastruktur Hijau-Biru dalam Perencanaan Wilayah Pesisir	81
I. Konstruksi Hibrida: Menggabungkan Sistem Akar <i>Mangrove</i> dengan Rekayasa Teknik	85
J. Menuju Infrastruktur Cerdas Berbasis Ekosistem (<i>Eco-Smart Infrastructure</i>)	90
BAB 3 SISTEM AKAR MANGROVE: ARSITEKTUR MIKRO YANG CANGGIH	95
A. Evolusi Biologis Akar <i>Mangrove</i> : Adaptasi terhadap Habitat Ekstrem	95
B. Klasifikasi Morfologi Akar <i>Mangrove</i>	97
C. Akar <i>Mangrove</i> sebagai Jaringan Kapiler Biologis	101
D. Mekanisme Penyerapan dan Transportasi Air dalam Jaringan Akar	105
E. Fungsi Filtrasi Akar terhadap Sedimen dan Polutan	107
F. Peran Akar dalam Retensi dan Infiltrasi Air Tanah	111
G. Dinamika Akar terhadap Variabilitas Pasang Surut dan Musim	114
H. Interaksi Akar dengan Mikroba dan Biota Tanah	118
I. Visualisasi dan Pemodelan Arsitektur Akar untuk Perencanaan Infrastruktur Alami	121
J. Akar <i>Mangrove</i> sebagai Prototipe <i>Bio-Engineered Network</i> Masa Depan	125
BAB 4 BIOHIDROLOGI MANGROVE: SAINS DI BALIK PENYERAPAN DAN FILTRASI AIR	131
A. Konsep Dasar Biohidrologi dalam Ekosistem Pesisir	131
B. Fungsi Hidrologis Sistem Akar <i>Mangrove</i>	135
C. Proses Penyerapan dan Akumulasi Logam Berat	138
D. Filtrasi Sedimen dan Kontrol Suspensi Material	142
E. Akar <i>Mangrove</i> dan Stabilitas Kualitas Air Tanah	145

F. Model Konseptual: Biofiltrasi Akar <i>Mangrove</i> sebagai Teknologi Ekohidrologi	149
G. Indeks Efisiensi Biohidrologi Akar <i>Mangrove</i> (IEBAM)	151
H. Perbandingan Efektivitas Biohidrologi dengan Sistem Buatan	155
I. Aplikasi Biohidrologi dalam Perencanaan Wilayah dan Mitigasi Bencana	159
J. Prospek Pengembangan Teknologi Biohidrologi Berbasis Akar di Masa Depan	162
BAB 5 KETAHANAN AIR PESISIR: AKAR MANGROVE SEBAGAI BUFFER SALINITAS	
DAN INTRUSI AIR LAUT	167
A. Intrusi Air Laut: Definisi, Mekanisme, dan Dampaknya di Wilayah Pesisir	167
B. Degradasi Lensa Air Tawar: Krisis Tersembunyi di Pulau-Pulau Kecil	170
C. Peran Vegetasi Pesisir dalam Mengendalikan Salinisasi	172
D. Sistem Akar <i>Mangrove</i> sebagai Zona Penyangga Osmotik	175
E. Konfigurasi Akar dan Pembentukan Zona Peralihan (<i>Transition Zone</i>)	179
F. Model Hidrodinamik <i>Buffer</i> Akar terhadap Intrusi Salin	183
G. Efektivitas Akar <i>Mangrove</i> dibandingkan Tanggul dan Polder	187
H. Integrasi Sistem Akar dalam Perencanaan Ketahanan Air Pulau Kecil	191
I. Indikator Biofisik dan Pemantauan Zona Penyangga <i>Mangrove</i>	195
J. Akar <i>Mangrove</i> sebagai Perisai Hidrologis Masa Depan	199
BAB 6 AKAR MANGROVE DALAM RESTORASI EKOSISTEM DAN REHABILITASI AIR TANAH ..	205
A. Restorasi Ekosistem Pesisir: Agenda Global dan Kebutuhan Mendesak	205
B. Kerusakan Sistem Air Tanah di Wilayah Pesisir	208
C. Strategi Konvensional Rehabilitasi Air Tanah: Keterbatasan dan Risiko	212
D. Akar <i>Mangrove</i> sebagai Solusi Rehabilitasi Vegetatif Berbasis Ekosistem	215
E. Mekanisme Infiltrasi dan Retensi Air oleh Sistem Akar <i>Mangrove</i>	218
F. Integrasi Teknik Rehabilitasi dan Restorasi Vegetatif Berbasis Akar	222
G. Desain Zona Restorasi Berbasis Densitas dan Konfigurasi Akar	225
H. Indikator Keberhasilan Restorasi Hidrologis Berbasis Akar	229
I. Studi Kasus Restorasi <i>Mangrove</i> dan Pemulihan Air Tanah	232
J. Rekomendasi Kebijakan dan Replikasi Skala Lanskap	235
BAB 7 AKAR MANGROVE DALAM REKAYASA EKOSISTEM UNTUK	
MITIGASI BANJIR DAN ROB	243
A. Pendahuluan: Ancaman Banjir dan Rob di Kawasan Pesisir	243
B. Dinamika Hidrologi Pesisir dan Peran Sistem Akar <i>Mangrove</i>	245
C. Konsep “Akar sebagai Bendungan Mikro Alami”: Paradigma Baru dalam Infrastruktur Alami	248
D. Morfologi Akar dan Efek Hidrodinamis terhadap Gelombang dan Pasang	250
E. Simulasi Hidrologis dan Pemodelan Interaksi Akar-Air di Zona Pesisir	253
F. Studi Komparatif: Efektivitas Akar <i>Mangrove</i> vs. Tanggul Beton	255
G. Integrasi <i>Mangrove</i> ke dalam Perencanaan Kota Tahan Banjir (<i>Flood-Resilient Urban Design</i>)	257
H. Teknik <i>Bioengineering</i> Berbasis Akar: Skema Implementasi dan Desain Modular	259
I. Studi Kasus Global: Implementasi Akar <i>Mangrove</i> sebagai Solusi Mitigasi Banjir	261
J. Rekomendasi Strategis dan Arah Riset Masa Depan	264

BAB 8 SOCIO-HYDROLOGICAL INTERFACE: MASYARAKAT DAN PENGETAHUAN LOKAL

TENTANG AKAR <i>MANGROVE</i>	267
A. Pendahuluan: Interseksi Sosial dan Hidrologi dalam Lanskap Pesisir	267
B. Perspektif Etnohidrologi: Pengetahuan Lokal tentang Air dan Akar <i>Mangrove</i>	269
C. Sistem Sosial-Ekologis dan Relasi Simbolik terhadap Akar <i>Mangrove</i>	271
D. Persepsi dan Kognisi Masyarakat tentang Fungsi Hidrologis Akar <i>Mangrove</i>	273
E. <i>Co-Design</i> Infrastruktur Air Komunitas Berbasis Akar <i>Mangrove</i>	276
F. Studi Kasus Etnohidrologi: Praktik Tradisional dan Adaptasi Inovatif.....	278
G. Model Partisipatif Pengelolaan Air Berbasis Pengetahuan Lokal.....	280
H. Gender, Keadilan Sosial, dan Peran Komunitas dalam Ekosistem Akar	283
I. Kolaborasi Transdisipliner dan Integrasi Ilmu–Adat–Teknologi	285
J. Arah Kebijakan dan Rekomendasi Strategis untuk Pendekatan <i>Socio-Hydrological</i>	288

BAB 9 KEBIJAKAN DAN TATA KELOLA: MENEMPATKAN AKAR *MANGROVE* DALAM

PETA INFRASTRUKTUR NASIONAL	291
A. Pendahuluan: Paradigma Baru dalam Infrastruktur Nasional Berbasis Ekosistem	291
B. Akar <i>Mangrove</i> sebagai Komponen Infrastruktur Publik: Basis Konseptual dan Legitimasi.....	294
C. Telaah Kebijakan Nasional Terkait NbS, REDD+, dan Infrastruktur Hijau.....	296
D. Tata Kelola Multi-Level: Integrasi Akar <i>Mangrove</i> dalam Perencanaan Wilayah dan Sektor.....	299
E. Kerangka Legal: Peluang Reformasi Regulasi untuk Proteksi Akar <i>Mangrove</i>	302
F. Skema Insentif dan Pembayaran Jasa Ekosistem (PES) untuk Akar <i>Mangrove</i>	303
G. Kelembagaan Adaptif: Desain Model Kelembagaan Berbasis Komunitas dan Pemerintah	306
H. Diplomasi Hijau dan Agenda Global: Menempatkan Akar <i>Mangrove</i> dalam COP, SDGs, dan NbS.....	308
I. Inovasi Tata Kelola: Teknologi, Data Spasial, dan Sistem Informasi Akar <i>Mangrove</i> ...	311
J. <i>Roadmap</i> Strategis: Agenda Transformasi Kebijakan Menuju Pengakuan Formal Akar <i>Mangrove</i>	314

BAB 10 MASA DEPAN KETAHANAN PESISIR: SIMBIOSIS TEKNOLOGI DAN

AKAR <i>MANGROVE</i>	319
A. Pendahuluan: Menggagas Masa Depan Infrastruktur Pesisir yang Cerdas dan Alami	319
B. Evolusi Teknologi dalam Ekologi Pesisir: dari <i>Remote Sensing</i> ke <i>Bio-Sensing</i>	322
C. <i>Intelligent Root System</i> (IRS): Konsep dan Prinsip Kerja	324
D. Desain Arsitektur IRS: Integrasi Sensor, IoT, dan <i>Cloud-Based Analytics</i>	327
E. Data Besar Akar <i>Mangrove</i> : Potensi <i>Big Data</i> untuk Mitigasi Risiko Pesisir	329
F. <i>Co-Evolution</i> : Kolaborasi Teknologi dan Ekosistem Akar dalam Adaptasi Iklim	332
G. Studi Kasus dan Uji Coba IRS di Wilayah Pesisir Global	335
H. Perspektif Etik dan Sosial dalam Teknologisasi Infrastruktur Alami	337
I. <i>Roadmap</i> 2050: Strategi Integrasi IRS dalam Infrastruktur Pesisir Nasional	340
J. Epilog: Akar <i>Mangrove</i> sebagai Antarmuka Cerdas Masa Depan	343

DAFTAR PUSTAKA	346
-----------------------------	------------

INDEXING	357
-----------------------	------------

PROFIL PENULIS	365
-----------------------------	------------

BAB 1

PENDAHULUAN:

AIR, PESISIR, DAN PERUBAHAN IKLIM

A. KONTEKS GLOBAL KRISIS AIR DAN PERUBAHAN IKLIM

Krisis air global dan perubahan iklim telah membentuk lanskap tantangan multidimensi yang saling terkait, dengan dampak paling nyata dirasakan di wilayah pesisir dan daerah rawan air (Roukounis & Tsihrintzis, 2022). Krisis air dan perubahan iklim bukanlah dua isu terpisah, melainkan satu spektrum tantangan yang saling menguatkan dan memperumit lanskap kebijakan, infrastruktur, dan keberlanjutan ekologis global (Boudreau *et al.*, 2022; UNEP, 2017). Dalam dekade terakhir, kombinasi antara peningkatan suhu rata-rata bumi dan degradasi sumber daya air telah menempatkan wilayah pesisir sebagai episentrum risiko. Para ahli dari berbagai disiplin ilmu telah memetakan konsekuensi langsung maupun tidak langsung dari perubahan iklim terhadap sistem hidrologi dunia. Dalam konteks ini, para pakar dari berbagai disiplin ilmu telah memberikan kontribusi signifikan dalam memahami dinamika ketersediaan air tawar yang kian menurun akibat peningkatan suhu global, naiknya muka laut, dan intensifikasi fenomena cuaca ekstrem (Khan & Paul, 2023). Uraian ini mengintegrasikan pandangan para ahli terkemuka yang mewakili berbagai perspektif ilmiah. Betts *et al.*, (2018) (ilmuwan air dan pendiri Pacific Institute) menekankan bahwa ketersediaan air tawar global tidak hanya mengalami penurunan kuantitas, tetapi juga penurunan kualitas. Huang *et al.*, (2021) menyatakan bahwa perubahan iklim telah memodifikasi siklus hidrologi global, mempercepat penguapan, mengubah pola curah hujan, dan memperbesar disparitas spasial antar wilayah basah dan kering, yang pada akhirnya memperkuat ketimpangan akses air di negara berkembang. Johan Rockström, ahli sistem bumi dari *Stockholm Resilience Centre*, mengidentifikasi air sebagai *planetary boundary* yang telah melampaui batas aman. Dalam penelitiannya bersama Mishra (2023), ia menyoroti bahwa tekanan terhadap sumber daya air tawar diperparah oleh meningkatnya suhu global yang mempercepat pencairan gletser, memperpendek musim salju, dan mengurangi *recharge akuifer* di banyak wilayah dunia. Roukounis & Tsihrintzis (2022), klimatologi dari NASA, menyoroti kerentanan sektor air dalam sistem pangan global. Chen *et al.*, (2021) menyatakan bahwa perubahan pola presipitasi ekstrem telah menyebabkan banjir di satu sisi dan kekeringan panjang di sisi lain, yang mengganggu pasokan air irigasi, memicu gagal panen, dan memperluas ketidakstabilan sosial, khususnya di kawasan pesisir agraris seperti Bangladesh dan Delta Nil. Saleemul Huq, ahli adaptasi iklim dari *International Centre for Climate Change and Development* (ICCCAD), mengemukakan bahwa komunitas pesisir di negara berkembang menghadapi *double exposure*: pertama terhadap intrusi salin akibat naiknya muka laut, dan kedua terhadap kekeringan air tanah akibat eksploitasi berlebihan. Ia menekankan pentingnya pendekatan berbasis komunitas dalam membangun ketahanan lokal terhadap krisis air (Betts *et al.*, 2018). Lee & Choi, (2018), ahli kebijakan iklim dari Princeton University dan penulis utama IPCC, menyatakan bahwa wilayah pesisir akan menjadi garis depan krisis air akibat *compound events*—gabungan antara kenaikan muka laut, badai siklon tropis, dan banjir rob yang mengancam pasokan air bersih dan infrastruktur sanitasi di kota-kota pesisir ((Vandenbohede & Lebbe, 2006). (Postel, 2017), pakar

BAB 2

INFRASTRUKTUR ALAMI DAN TRANSISI DARI REKAYASA ABU-ABU KE HIJAU-BIRU

A. EVOLUSI PEMIKIRAN INFRASTRUKTUR AIR: DARI *HARD ENGINEERING* KE PENDEKATAN EKOLOGIS

Evolusi pemikiran infrastruktur air mengalami pergeseran paradigmatik yang signifikan, dari pendekatan *hard engineering* yang menekankan kontrol dan dominasi atas alam, menuju pendekatan ekosistemik yang menekankan kerja sama dengan proses alamiah untuk mencapai ketahanan air. Transformasi ini tidak hanya bersifat teknis, melainkan juga konseptual dan kelembagaan, mencerminkan respons terhadap tantangan kompleks abad ke-21, termasuk perubahan iklim, degradasi ekosistem, dan tekanan sosial-ekonomi. Pada awal abad ke-20 hingga pertengahan abad ke-21, pembangunan infrastruktur air didominasi oleh pendekatan *grey infrastructure* yang berfokus pada konstruksi fisik seperti bendungan, saluran irigasi beton, tanggul banjir, dan sistem pompa (Molle *et al.*, 2009). Pendekatan ini sangat dipengaruhi oleh prinsip rekayasa klasik dan modernisme yang mengedepankan prediktabilitas, kontrol, dan efisiensi teknis (Biswas, 2004). Dalam konteks ini, air diperlakukan sebagai komoditas fisik yang harus dikuasai melalui teknologi. Namun, mulai dekade 1990-an, terjadi krisis dalam pendekatan ini. Banyak proyek rekayasa air skala besar gagal beradaptasi dengan variabilitas iklim, menyebabkan kerentanan struktural dan sosial. Contohnya, kegagalan sistem bendungan di New Orleans pasca-Badai Katrina pada 2005 menyoroti keterbatasan teknologi konvensional dalam merespons ekstremitas iklim (Pahl-Wostl, 2007). Selain itu, dampak ekologis dari pembangunan infrastruktur konvensional – seperti fragmentasi habitat, sedimentasi, dan penurunan kualitas air – memicu kritik dari kalangan ilmuwan lingkungan (Postel & Richter, 2003). Sebagai respons terhadap krisis ini, berbagai pendekatan baru mulai berkembang, yang menempatkan alam bukan sebagai objek yang dikendalikan, tetapi sebagai mitra dalam solusi pengelolaan air. Salah satu pendekatan utama yang muncul adalah *Nature-based Solutions* (NbS), yang menekankan restorasi dan perlindungan ekosistem alami (seperti hutan, lahan basah, dan *mangrove*) untuk menyediakan jasa hidrologis secara berkelanjutan (WWAP, 2018). NbS dianggap lebih fleksibel, murah dalam jangka panjang, dan memiliki manfaat ikutan seperti konservasi keanekaragaman hayati dan peningkatan mata pencaharian masyarakat lokal (Cohen-Shacham *et al.*, 2016). Menurut Sandra Postel (2007), integrasi pendekatan berbasis alam ke dalam perencanaan infrastruktur air adalah bentuk "revolusi biru" yang merekonstruksi hubungan manusia dengan siklus hidrologi. Pendekatan ini menantang asumsi lama yang menempatkan kontrol manusia sebagai pusat pengelolaan sumber daya. Sementara itu, Elinor Ostrom (1990) menyoroti pentingnya tata kelola kolektif dan kelembagaan lokal dalam memastikan keberhasilan pendekatan ekosistem, menandai pergeseran dari solusi teknis menuju solusi sosial-ekologis.

Dalam perspektif sistem, Pahl-Wostl (2007) memperkenalkan konsep *adaptive water management*, yang menekankan pentingnya pembelajaran sosial dan keberlanjutan kelembagaan dalam merancang sistem pengelolaan air yang tahan terhadap ketidakpastian. Model ini mendukung integrasi NbS dalam sistem infrastruktur hibrida, di mana teknologi dan proses ekologis saling melengkapi. Dari sisi ekonomi, Barbier (2011) menyatakan bahwa valuasi

BAB 3

SISTEM AKAR *MANGROVE*: ARSITEKTUR MIKRO YANG CANGGIH

A. EVOLUSI BIOLOGIS AKAR *MANGROVE*: ADAPTASI TERHADAP HABITAT EKSTREM

Akar *mangrove* telah mengalami proses evolusi yang panjang dan kompleks sebagai respons terhadap tekanan ekologis ekstrem yang khas di lingkungan pesisir. Karakteristik habitat seperti kadar salinitas tinggi, substrat jenuh air dengan kadar oksigen terlarut rendah, serta fluktuasi pasang surut harian yang ekstrem menuntut sistem adaptasi morfologis, fisiologis, dan ekologis yang unik. Menurut Tomlinson (1986), bentuk dan fungsi akar *mangrove* merupakan hasil seleksi alam yang mendukung kemampuan bertahan hidup dan reproduksi spesies di zona intertidal, menjadikannya salah satu sistem perakaran paling adaptif di antara tumbuhan pesisir. Adaptasi ini tidak hanya penting bagi stabilitas individu tumbuhan, tetapi juga menciptakan fondasi struktural dan hidrologis bagi keseluruhan ekosistem pesisir. Berbagai bentuk akar khas—seperti akar napas (*pneumatophore*), akar tunjang (*stilt roots*), akar lutut (*knee roots*), dan akar papan (*buttress roots*)—menunjukkan strategi adaptasi berbeda yang muncul melalui konvergensi evolusioner. *Avicennia spp.*, misalnya, memiliki pneumatofor vertikal yang memungkinkan pertukaran gas dalam kondisi anaerob, sedangkan *Rhizophora spp.* membentuk akar tunjang yang memperkuat kestabilan pohon dan meningkatkan pengendapan sedimen (Kathiresan & Bingham, 2001). Penelitian oleh Ball (1988) menunjukkan bahwa spesies *mangrove* juga mengembangkan kemampuan fisiologis untuk menolak atau mengekskresikan garam melalui akar dan daun, sambil mengakumulasi senyawa osmolit seperti manitol untuk mempertahankan tekanan osmotik internal. Adaptasi ini tidak hanya meningkatkan toleransi terhadap salinitas, tetapi juga memungkinkan spesies *mangrove* berfungsi sebagai sistem filtrasi alami terhadap air asin maupun air tercemar. Lebih jauh, akar *mangrove* berperan penting dalam mendukung kestabilan hidrologis jangka panjang melalui kontribusinya terhadap peningkatan infiltrasi, pengurangan erosi, serta peningkatan retensi dan kualitas air tanah. Krauss *et al.* (2008) menegaskan bahwa sistem akar *mangrove* dapat memperlambat aliran permukaan dan meningkatkan deposisi sedimen, sehingga membantu mempertahankan elevasi lahan pesisir terhadap kenaikan muka air laut. Selain itu, struktur akar yang kompleks menyediakan habitat mikro bagi berbagai organisme bentik dan meningkatkan kapasitas tanah dalam menyimpan karbon organik, menjadikan *mangrove* sebagai komponen krusial dari sistem *blue carbon*. Oleh karena itu, bentuk dan fungsi akar *mangrove* harus dipandang sebagai hasil evolusi ekologis yang tidak hanya mengatasi tekanan lingkungan, tetapi juga membentuk kerangka biofisik bagi keberlanjutan hidrologis dan ekosistem pesisir secara keseluruhan.

Mangrove merupakan salah satu kelompok tumbuhan yang mengalami evolusi paling unik dan kompleks dalam menghadapi tekanan ekologis. Tumbuh di wilayah pesisir yang berada di antara darat dan laut, *mangrove* harus mampu beradaptasi terhadap tantangan lingkungan yang sangat ekstrem: salinitas tinggi, substrat anaerob dan jenuh air, fluktuasi pasang surut, serta erosi dan sedimen yang dinamis. Adaptasi ini terwujud secara nyata dalam struktur dan fungsi sistem akar *mangrove*, yang menjadikannya sebagai bentuk arsitektur mikro biologis paling canggih di ekoton pesisir.

BAB 4

BIOHIDROLOGI MANGROVE: SAINS DI BALIK PENYERAPAN DAN FILTRASI AIR

A. KONSEP DASAR BIOHIDROLOGI DALAM EKOSISTEM PESISIR

Biohidrologi (*biohydrology*) merupakan disiplin ilmu interdisipliner yang menggabungkan prinsip-prinsip ekologi tumbuhan dan ilmu hidrologi untuk memahami bagaimana organisme biologis, terutama vegetasi, berinteraksi secara aktif dengan siklus air di berbagai skala ekosistem (Rodriguez-Iturbe, 2000). Dalam konteks ekosistem pesisir, biohidrologi berperan penting dalam menjelaskan keterkaitan antara struktur dan fungsi vegetasi seperti *mangrove*, dengan proses hidrologis seperti infiltrasi, perkolasi, evapotranspirasi, dan pengisian ulang air tanah. Pendekatan ini tidak hanya mempelajari vegetasi sebagai penerima air, tetapi juga sebagai agen aktif dalam pembentukan pola aliran air dan keseimbangan hidrologi regional. *Mangrove* merupakan model ideal dalam studi biohidrologi karena memiliki sistem perakaran yang sangat adaptif terhadap kondisi hidrologis ekstrem seperti fluktuasi pasang surut, salinitas tinggi, dan substrat jenuh air. Akar *mangrove* tidak hanya menyerap air, tetapi juga berperan sebagai filter, penyimpan, dan pengatur dinamika air dalam zona intertidal. Menurut Krauss *et al.* (2008), akar *mangrove* menciptakan zona rizosfer yang meningkatkan infiltrasi, mengurangi limpasan, dan mempertahankan kelembaban tanah secara efisien. Peran multifungsi ini menjadikan *mangrove* sebagai *biological hydraulic unit* dalam sistem pesisir yang kompleks. Dalam kerangka teoritis biohidrologi, keberadaan vegetasi diasumsikan mampu memodulasi proses hidrologi melalui interaksi struktur akar, biomassa, dan respons fisiologis terhadap tekanan air tanah. Pada *mangrove*, keberadaan jaringan akar napas dan akar lateral memungkinkan pertukaran gas dan air dalam tanah jenuh oksigen rendah, sambil mempertahankan tekanan osmotik dalam jaringan tanaman. Tomlinson (1986) menjelaskan bahwa adaptasi ini merupakan bentuk *bioengineering alami*, di mana struktur biologis mengubah dan mempertahankan stabilitas lingkungan fisik secara aktif.

Biohidrologi dalam ekosistem pesisir juga mencakup studi tentang evapotranspirasi vegetasi dan kontribusinya terhadap siklus air lokal. Evapotranspirasi *mangrove* berperan dalam memindahkan uap air dari tanah dan permukaan daun ke atmosfer, sekaligus memengaruhi kelembaban mikroklimat lokal. Ball (1988) mencatat bahwa evapotranspirasi *mangrove* dapat menyumbang lebih dari 50% dari total kehilangan air dalam sistem delta tropis. Proses ini berkontribusi pada pendinginan lokal, pembentukan awan, dan pengaruh terhadap pola curah hujan di wilayah pesisir. Cakupan lain dari biohidrologi pesisir mencakup interaksi antara vegetasi dan morfologi saluran air atau garis pantai. Vegetasi seperti *mangrove* memperlambat aliran air pasang, mempercepat deposisi sedimen, dan membentuk delta serta pulau-pulau baru. Proses ini dikenal sebagai *ecogeomorphic feedback*, di mana vegetasi memengaruhi dinamika geomorfologi melalui mekanisme hidrologi yang dikontrol secara biologis (Temmerman & Kirwan, 2015). Oleh karena itu, biohidrologi tidak hanya bersifat pasif, tetapi juga bersifat konstruktif terhadap lanskap. Peran biohidrologis *mangrove* semakin menonjol ketika dikaitkan dengan mitigasi bencana hidrometeorologis seperti banjir rob, tsunami, dan badai tropis. Akar *mangrove* memperlambat gelombang dan meredam energi air yang masuk ke daratan. Menurut

BAB 5

KETAHANAN AIR PESISIR: AKAR *MANGROVE* SEBAGAI *BUFFER* SALINITAS DAN INTRUSI AIR LAUT

A. INTRUSI AIR LAUT: DEFINISI, MEKANISME, DAN DAMPAKNYA DI WILAYAH PESISIR

Roadmap 2050 merupakan kerangka strategis jangka panjang yang dirancang untuk mengintegrasikan *Intelligent Root System* (IRS) ke dalam sistem pembangunan infrastruktur pesisir nasional sebagai pilar utama dari *natural intelligent infrastructure*. IRS diposisikan tidak hanya sebagai inovasi teknologi lingkungan, tetapi sebagai pendekatan sistemik yang menjadikan akar *mangrove* sebagai simpul kecerdasan ekologis dan solusi berbasis alam untuk menjawab tantangan perubahan iklim, krisis air, dan degradasi pesisir. Menurut Seddon *et al.* (2020), *Nature-based Solutions* (NbS) harus diarusutamakan dalam sistem infrastruktur agar memiliki dampak transformatif terhadap ketahanan iklim. Fase awal *roadmap*, yakni 2025–2030, berfokus pada *proof-of-concept* dan pilot *project* IRS di kawasan pesisir prioritas nasional, seperti pesisir timur Sumatra, Pantura Jawa, pesisir Kalimantan, serta wilayah konservasi di Maluku dan Papua. Pada tahap ini, pengembangan IRS akan difokuskan pada sistem sensor akar, pengumpulan data biohidrologi, serta integrasi dengan Sistem Informasi Spasial Kementerian/Lembaga. Menurut Yin (2014), pendekatan studi kasus pada tahap awal pengembangan teknologi sangat penting untuk membangun validasi empiris dan model operasional awal. Pada fase 2030–2035, *roadmap* memasuki tahap *scaling-up* melalui penerapan IRS di berbagai zona pesisir berbasis kluster ekosistem *mangrove* nasional. Program ini melibatkan harmonisasi kebijakan lintas sektor (KLHK, KKP, Bappenas, dan Kemendagri), integrasi IRS ke dalam rencana zonasi wilayah pesisir dan pulau-pulau kecil (RZWP3K), serta pemanfaatan data IRS untuk mendukung Rencana Aksi Daerah Perubahan Iklim (RAD-API). Seperti dikemukakan oleh Ostrom (2009), keberhasilan integrasi tata kelola memerlukan sistem kelembagaan yang memungkinkan adaptasi multiskala dan keterlibatan aktor lintas sektor.

Fase 2035–2040 menekankan pada penguatan regulasi dan kelembagaan IRS, termasuk penerbitan Peraturan Presiden atau regulasi sektoral yang mengakui IRS sebagai infrastruktur pendukung ketahanan pesisir. Pada tahap ini, pemerintah perlu mengembangkan skema insentif fiskal, pendanaan transisi hijau, dan mekanisme *blended finance* untuk mendukung replikasi IRS di tingkat provinsi dan kabupaten/kota. Menurut Rodrik (2007), transisi teknologi memerlukan dukungan kebijakan afirmatif dan insentif yang mampu mendorong adopsi sistemik. Memasuki fase 2040–2045, *roadmap* diarahkan pada penguatan kapasitas lokal dan nasional melalui integrasi IRS dalam kurikulum pendidikan lingkungan, program pelatihan teknis, serta kolaborasi riset antar-universitas. Data IRS juga mulai dimanfaatkan untuk pengembangan AI ekohidrologi nasional dan sistem prediksi bencana pesisir berbasis akar. Hal ini sejalan dengan konsep *ecological learning systems* yang dikembangkan oleh Berkes & Folke (1998), yang menekankan pentingnya pembangunan kapasitas melalui *co-production of knowledge* antara ilmuwan, masyarakat, dan pembuat kebijakan. Fase 2045–2050 menargetkan pengakuan IRS sebagai sistem infrastruktur strategis nasional, setara dengan infrastruktur transportasi, energi, dan komunikasi. IRS akan menjadi elemen penting dalam *blue-green infrastructure* nasional yang menggabungkan ekosistem alami dan teknologi cerdas untuk mendukung

BAB 6

AKAR MANGROVE DALAM RESTORASI EKOSISTEM DAN REHABILITASI AIR TANAH

A. RESTORASI EKOSISTEM PESISIR: AGENDA GLOBAL DAN KEBUTUHAN MENDESAK

Restorasi ekosistem pesisir kini menjadi bagian integral dari agenda lingkungan global, seiring meningkatnya tekanan akibat perubahan iklim, urbanisasi pesisir, dan eksploitasi sumber daya yang menyebabkan degradasi luas pada *mangrove*, rawa asin, dan lahan basah lainnya. Menurut Dasgupta (2021), lebih dari 35% ekosistem pesisir dunia telah hilang atau terdegradasi dalam satu abad terakhir, yang berdampak langsung pada kerentanan wilayah pesisir terhadap abrasi, intrusi salin, dan kehilangan lensa air tawar. Hal ini mendorong urgensi transformasi pendekatan restorasi dari sekadar rehabilitasi vegetasi menjadi pemulihan sistem ekologis secara holistik. Secara global, inisiatif seperti *UN Decade on Ecosystem Restoration (2021–2030)* menekankan pentingnya mengintegrasikan aspek hidrologi dalam upaya restorasi, dengan menargetkan pemulihan fungsi regulasi air, penyerapan karbon biru, dan ketahanan terhadap bencana iklim (UNEP, 2020). Di wilayah pesisir, hal ini mencakup restorasi konektivitas hidrologi antara laut dan daratan, peningkatan kualitas air tanah, serta perlindungan zona transisi pesisir yang berperan sebagai penyangga osmotik alami (Seddon *et al.*, 2020). Di tingkat regional, negara-negara Asia Tenggara menghadapi tekanan besar terhadap sistem akuifer pesisir dan ekosistem *mangrove*. Indonesia, misalnya, telah kehilangan lebih dari 40% tutupan *mangrove*-nya sejak tahun 1980-an (Giri *et al.*, 2011), yang menyebabkan kerentanan tinggi terhadap banjir rob dan kontaminasi air tanah oleh air laut. Hal ini menuntut pendekatan restorasi yang tidak hanya fokus pada *replanting*, tetapi juga pemulihan regime air tanah, kualitas sedimen, dan stabilisasi zona sempadan.

Paradigma restorasi saat ini bergeser dari model teknokratik ke pendekatan ekohidrologis, yang menggabungkan proses biologis dan fisik dalam perencanaan pemulihan lanskap. Akar vegetasi pesisir seperti *mangrove* kini diakui tidak hanya sebagai elemen penyerap karbon, tetapi juga sebagai komponen aktif dalam pengaturan salinitas, tekanan air tanah, dan infiltrasi air hujan (Krauss *et al.*, 2014). Dalam kerangka ini, akar berfungsi sebagai sistem kontrol dinamis yang dapat membentuk zona transisi osmotik dan memperkuat ketahanan air. Menurut Walters *et al.* (2008), keberhasilan restorasi tidak hanya diukur dari pertumbuhan vegetasi, tetapi juga dari pemulihan fungsi ekosistem, seperti kapasitas filtrasi tanah, kestabilan salinitas vertikal, dan peningkatan kapasitas tangkapan air (*recharge*). Dengan kata lain, indikator hidrologis seperti konduktivitas listrik tanah (EC), kedalaman lensa air tawar, dan kelembaban tanah menjadi metrik penting dalam evaluasi restorasi pesisir modern. Restorasi juga harus mempertimbangkan dinamika sosial dan tata kelola lahan. Di banyak kawasan pesisir, lahan basah telah dikonversi menjadi tambak, industri, atau permukiman informal. Oleh karena itu, pemulihan perlu disertai dengan pendekatan kebijakan integratif yang mengakui hak masyarakat lokal dan mendorong partisipasi dalam desain ulang ekosistem yang rusak (Barbier *et al.*, 2011). Strategi seperti *payment for ecosystem services (PES)* dan skema REDD+ berbasis *mangrove* dapat memperkuat insentif ekonomi untuk restorasi. Selain pendekatan berbasis darat, restorasi konektivitas laut-darat melalui normalisasi saluran pasang surut, pelepasan zona

BAB 7

AKAR MANGROVE DALAM REKAYASA EKOSISTEM UNTUK MITIGASI BANJIR DAN ROB

A. PENDAHULUAN: ANCAMAN BANJIR DAN ROB DI KAWASAN PESISIR

Kawasan pesisir di seluruh dunia, terutama di negara-negara tropis dan kepulauan seperti Indonesia, menghadapi peningkatan signifikan kejadian banjir pesisir dan rob (*coastal flooding and tidal inundation*). Hal ini diperparah oleh kenaikan muka air laut, intensitas badai tropis, dan penurunan muka tanah akibat ekstraksi air tanah dan beban bangunan. Menurut IPCC (2021), permukaan laut global diproyeksikan naik antara 0,6 hingga 1,1 meter pada akhir abad ke-21, menjadikan wilayah pesisir sebagai zona risiko tinggi terhadap kerusakan infrastruktur, gangguan mata pencaharian, dan hilangnya lahan produktif. Di Indonesia, kejadian rob semakin sering terjadi di kota-kota pesisir seperti Semarang, Pekalongan, dan Tegal, menyebabkan kerugian ekonomi hingga miliaran rupiah setiap tahunnya (Marfai *et al.*, 2015). Rob bukan hanya ancaman ekologis, tetapi juga fenomena sosial dan ekonomi, karena berdampak langsung pada kelompok miskin yang tinggal di wilayah terdepan dan tidak memiliki akses terhadap sistem perlindungan yang memadai. Dalam konteks ini, pendekatan mitigasi berbasis infrastruktur abu-abu (seperti tanggul dan pompa) seringkali tidak cukup fleksibel, mahal dalam pemeliharaan, dan memiliki dampak ekologis jangka panjang. Sebagai alternatif, pendekatan berbasis ekosistem atau *Nature-based Solutions* (NbS) kini diakui secara global sebagai strategi yang efektif dan berkelanjutan untuk mengurangi risiko banjir dan rob. NbS memanfaatkan fungsi alami ekosistem seperti *mangrove*, rawa pasang surut, dan padang lamun dalam menyerap energi gelombang, meningkatkan infiltrasi, dan memperlambat aliran air. Akar *mangrove* dalam hal ini memiliki peran strategis sebagai penghambat aliran air dan penyerap energi ombak, sehingga memberikan perlindungan pasif terhadap garis pantai. Menurut Spalding *et al.* (2014), sistem akar *mangrove* dapat mengurangi ketinggian gelombang sebesar 13–66% per 100 meter hutan, tergantung pada spesies, kepadatan, dan kedalaman air. Akar napas (*pneumatophore*), akar tunjang (*prop root*), dan akar kabel (*cable root*) membentuk struktur biofisik kompleks yang meningkatkan koefisien gesek hidraulik, memperlambat kecepatan arus, dan menangkap sedimen yang terbawa air pasang. Hal ini secara langsung memperkuat garis pantai dan mengurangi kemungkinan terjadinya *overtopping* saat banjir. Selain fungsi hidraulik, akar *mangrove* juga menciptakan zona penyangga osmotik dan mekanis antara laut dan darat, mengatur keseimbangan air tanah dan menghambat pergerakan air asin ke daratan. Fungsi ini sangat penting di wilayah pesisir dataran rendah yang menghadapi risiko ganda: rob dari laut dan banjir dari darat. Studi oleh Krauss *et al.* (2009) menunjukkan bahwa wilayah yang ditumbuhi *mangrove* memiliki penurunan fluktuasi salinitas tanah dan air tanah yang signifikan, menjaga stabilitas sistem biohidrologi lokal.

Di banyak wilayah Asia Tenggara, program restorasi *mangrove* kini tidak hanya ditujukan untuk konservasi keanekaragaman hayati, tetapi juga sebagai bagian dari rekayasa ekosistem untuk perlindungan wilayah pesisir. Misalnya, di Filipina dan Vietnam, hutan *mangrove* dikombinasikan dengan tanggul permeabel sebagai sistem *hybrid protection*. Model ini mengurangi tekanan pada infrastruktur fisik dan memperpanjang umur layanan proteksi secara

BAB 8

SOCIO-HYDROLOGICAL INTERFACE: MASYARAKAT DAN PENGETAHUAN LOKAL TENTANG AKAR MANGROVE

A. PENDAHULUAN: INTERSEKSI SOSIAL DAN HIDROLOGI DALAM LANSKAP PESISIR

Ketahanan air di wilayah pesisir kini dipahami tidak hanya sebagai persoalan teknik hidrologi atau manajemen sumber daya alam semata, melainkan sebagai persoalan kompleks yang berada dalam wilayah pertemuan antara sistem ekologis dan sistem sosial. Dalam kerangka ini, pendekatan *socio-hydrological interface* menjadi sangat relevan, yakni pendekatan yang memadukan dinamika aliran air dengan praktik sosial, pengetahuan lokal, dan struktur kelembagaan masyarakat (Sivapalan *et al.*, 2012). Pendekatan ini menggarisbawahi bahwa sistem air, termasuk akuifer dangkal, limpasan, dan infiltrasi, tidak dapat dilepaskan dari interaksi manusia. Di wilayah pesisir, interaksi ini sangat dipengaruhi oleh keberadaan vegetasi pantai seperti *mangrove*, terutama sistem akarnya yang tidak hanya berperan dalam pengaturan hidrologi, tetapi juga mengandung nilai simbolik dan ekologis dalam kebudayaan masyarakat pesisir (Lele, 2017; Walters *et al.*, 2008). Akar *mangrove* berfungsi sebagai penghubung fisik dan sosial dalam lanskap pesisir. Secara biofisik, akar *mangrove* memperlambat aliran air, meningkatkan infiltrasi, dan menahan sedimen. Secara sosial, masyarakat memaknainya sebagai “penyangga hidup”, perlindungan alami yang diturunkan dari generasi ke generasi sebagai bagian dari pengetahuan lokal dan sistem kepercayaan komunitas (Setyowati *et al.*, 2019). Dalam banyak komunitas adat, akar *mangrove* dianggap memiliki kekuatan pelindung dari “air jahat” atau pasang buruk. Studi di wilayah pesisir Maluku dan Papua, seperti yang dikemukakan oleh Latumahina *et al.* (2022), menunjukkan bahwa masyarakat menggunakan indikator alami seperti warna akar, suhu lumpur di sekitar akar, dan bau tanah sebagai penanda perubahan kualitas air atau tanda datangnya intrusi salin. Pengetahuan ini menunjukkan bahwa masyarakat memiliki sistem pengamatan dan pengelolaan air yang berbasis akar dan vegetasi secara turun-temurun. Dari perspektif hidrologi sosial, akar *mangrove* bukan hanya elemen vegetatif, tetapi juga merupakan bagian dari infrastruktur sosial-ekologis yang membentuk relasi antara manusia dan air. Seperti dijelaskan oleh Lane (2014), keberhasilan pengelolaan sumber daya air tidak dapat dipisahkan dari bagaimana masyarakat memaknai dan merawat lanskapnya. Dalam konteks ini, akar *mangrove* merupakan representasi konkret dari hubungan tersebut. Praktik lokal seperti larangan penebangan akar, ritual pemberian sesajen di kawasan *mangrove*, serta pengelompokan zona konservasi berbasis adat merupakan wujud dari *governance* tradisional berbasis vegetasi. Praktik ini secara tidak langsung memperkuat sistem perlindungan air dan memperpanjang umur ekologis akuifer dangkal di wilayah pesisir (Boelens *et al.*, 2016).

Dalam beberapa studi di Asia Tenggara, termasuk di Filipina dan Thailand, akar *mangrove* menjadi bagian dari sistem irigasi alami yang disebut sebagai *eco-buffer zones*—area transisi antara laut dan darat yang diatur secara sosial dan spiritual. Proyek konservasi berbasis masyarakat seperti di Bohol (Filipina) menunjukkan bahwa integrasi pengetahuan lokal dengan pendekatan hidrologi modern memberikan hasil signifikan dalam pengurangan banjir dan peningkatan kualitas air (Blanco *et al.*, 2014). Oleh karena itu, pendekatan *socio-hydrological*

BAB 9

KEBIJAKAN DAN TATA KELOLA: MENEMPATKAN AKAR MANGROVE DALAM PETA INFRASTRUKTUR NASIONAL

A. PENDAHULUAN: PARADIGMA BARU DALAM INFRASTRUKTUR NASIONAL BERBASIS EKOSISTEM

Dalam menghadapi krisis air, perubahan iklim, dan degradasi lingkungan, pembangunan infrastruktur nasional tidak dapat lagi bergantung secara eksklusif pada pendekatan teknis konvensional yang berfokus pada infrastruktur abu-abu (*grey infrastructure*) seperti bendungan, kanal, dan tanggul beton. Pendekatan ini, meskipun efektif dalam jangka pendek, terbukti memiliki keterbatasan dalam menghadapi dinamika alam yang kompleks dan tidak pasti. Oleh karena itu, telah muncul urgensi untuk mengadopsi paradigma baru yang menempatkan *infrastruktur hijau-biru (green-blue infrastructure)* berbasis sistem alami sebagai fondasi utama dalam perencanaan pembangunan nasional yang resilien dan berkelanjutan (Benedict & McMahon, 2002; Masi *et al.*, 2018).

Infrastruktur hijau-biru mengacu pada sistem alam dan semi-alam seperti hutan *mangrove*, lahan basah, sungai alami, dan vegetasi riparian yang dirancang atau dilestarikan untuk memberikan fungsi ekosistem vital. Dalam konteks ketahanan air, sistem ini menyediakan jasa penyimpanan, filtrasi, dan distribusi air secara pasif dan berkelanjutan. Menurut Kabisch *et al.* (2017), pendekatan ini tidak hanya berkontribusi terhadap konservasi lingkungan, tetapi juga memperkuat infrastruktur sosial dan ekonomi masyarakat melalui peningkatan kualitas hidup dan pengurangan risiko bencana. Salah satu komponen utama dalam infrastruktur hijau-biru yang mulai diakui secara luas adalah sistem akar *mangrove*. Sistem perakaran *mangrove* berfungsi sebagai unit biohidrologi alami yang mampu menyaring sedimen dan polutan, menstabilkan garis pantai, dan mempertahankan cadangan air tanah di wilayah pesisir. Spalding *et al.* (2010) menekankan bahwa keberadaan *mangrove* dapat meningkatkan daya lenting (*resilience*) wilayah pesisir hingga 2 kali lipat dibandingkan kawasan yang tidak memiliki penyangga vegetatif. Peralihan paradigma ini sejalan dengan pendekatan *nature-based solutions* (NbS) yang diadopsi dalam berbagai kebijakan global, termasuk oleh IUCN dan UNEP. NbS menekankan bahwa solusi terhadap tantangan pembangunan dan perubahan iklim dapat diperoleh dengan melestarikan, memulihkan, dan mengelola sistem alami secara efektif. Dalam konteks Indonesia, pendekatan ini memiliki relevansi tinggi mengingat negara ini memiliki garis pantai terpanjang kedua di dunia dan ekosistem *mangrove* terbesar secara global (Alongi, 2002). Kritik terhadap dominasi infrastruktur abu-abu menunjukkan bahwa struktur tersebut cenderung kaku, berumur pendek, dan memiliki biaya operasional tinggi. Selain itu, infrastruktur teknis tidak mampu beradaptasi secara alami terhadap perubahan iklim, sehingga sering kali menyebabkan kegagalan sistemik dalam pengelolaan air, khususnya di wilayah pesisir dan pulau-pulau kecil (Temmerman & Kirwan, 2015). Sebaliknya, infrastruktur hijau-biru bersifat adaptif, dinamis, dan dapat memperbarui dirinya sendiri seiring waktu. Pergeseran kebijakan menuju infrastruktur berbasis ekosistem juga memiliki dimensi ekonomi dan sosial yang kuat. Barbier *et al.* (2011) menunjukkan bahwa nilai jasa ekosistem dari hutan *mangrove*, jika dihitung berdasarkan pengurangan kerusakan akibat bencana dan konservasi sumber daya air, dapat

BAB 10

MASA DEPAN KETAHANAN PESISIR: SIMBIOSIS TEKNOLOGI DAN AKAR *MANGROVE*

A. PENDAHULUAN: MENGGAGAS MASA DEPAN INFRASTRUKTUR PESISIR YANG CERDAS DAN ALAMI

Tantangan utama pembangunan wilayah pesisir di abad ke-21 adalah peningkatan intensitas dan frekuensi bencana iklim, termasuk banjir rob, kenaikan muka air laut, dan abrasi pantai. Infrastruktur konvensional yang bersifat kaku dan pasif, seperti tanggul beton dan pemecah ombak, terbukti memiliki keterbatasan dalam menjawab kompleksitas risiko ekologis dan sosial tersebut. Menurut Nichols *et al.* (2007), solusi berbasis infrastruktur abu-abu sering kali tidak adaptif, tidak fleksibel terhadap perubahan lingkungan, dan mahal dalam pemeliharaan. Dalam konteks tersebut, muncullah urgensi untuk merancang infrastruktur pesisir yang cerdas dan alami, yang menggabungkan kekuatan teknologi modern dan fungsi ekologis sistem alami. Transisi paradigma dari infrastruktur pasif ke *intelligent hybrid infrastructure* berbasis simbiosis antara teknologi dan akar *mangrove* menjadi jalan tengah yang menjanjikan. Seperti dijelaskan oleh Cheong *et al.* (2013), pendekatan berbasis ekosistem dan teknologi secara simultan dapat meningkatkan efektivitas perlindungan pesisir dan mendukung pembangunan berkelanjutan. Akar *mangrove* memiliki struktur bawah tanah yang kompleks dan multifungsi, berperan sebagai peredam gelombang, penyimpan karbon biru, penyaring air, dan penjaga stabilitas sedimen. Ketika dikombinasikan dengan teknologi sensor, perangkat IoT, dan sistem informasi spasial, akar *mangrove* dapat menjadi elemen sentral dari sistem infrastruktur pesisir adaptif yang cerdas. Menurut Duarte *et al.* (2013), hutan *mangrove* mampu meredam energi gelombang hingga 66% dalam jarak 100 meter, menjadikannya pelindung alami yang dapat ditingkatkan secara teknologis.

Konsep *intelligent hybrid infrastructure* (IHI) memadukan *nature-based solutions* (NbS) dan *smart technology* seperti *big data*, *artificial intelligence* (AI), dan penginderaan jauh untuk menciptakan sistem perlindungan pesisir yang tanggap terhadap perubahan dan berbasis informasi *real-time*. IHI mengedepankan modularitas, kemampuan belajar sistemik, dan umpan balik berbasis data untuk mendukung pengambilan keputusan yang cepat dan presisi (Fisher *et al.*, 2015). Salah satu keunggulan IHI adalah kemampuannya untuk mengintegrasikan data hidrologis, ekologi, dan sosial dalam satu sistem berbasis *cloud* yang dapat digunakan oleh berbagai pemangku kepentingan—dari pemerintah desa hingga kementerian pusat. Dengan pemetaan akar *mangrove* secara spasial dan pelacakan perubahan kualitas air serta tekanan salinitas melalui sensor akar, pengelolaan pesisir menjadi lebih responsif dan efisien. Hal ini sesuai dengan temuan Guerri *et al.* (2015) mengenai efektivitas infrastruktur berbasis ekosistem bila didukung data ekologi presisi tinggi. Di sisi lain, pendekatan ini juga menjawab tantangan keterbatasan anggaran publik dengan menyediakan solusi yang relatif rendah biaya dalam jangka panjang. Restorasi *mangrove* dan penguatan sistem akar sebagai bagian dari infrastruktur cerdas dapat dilakukan secara bertahap, berbasis komunitas, dan memanfaatkan teknologi lokal. Menurut Temmerman *et al.* (2013), NbS berbasis vegetasi pesisir tidak hanya lebih hemat biaya, tetapi juga memberikan manfaat tambahan berupa peningkatan

DAFTAR PUSTAKA

- Abdrabo, K. I., Kantoush, S. A., Esmail, A., Saber, M., Sumi, T., Almamari, M., Elboshy, B., & Ghoniem, S. (2023). An integrated indicator-based approach for constructing an urban flood vulnerability index as an urban decision-making tool using the PCA and AHP techniques: A case study of Alexandria, Egypt. *Urban Climate*, 48. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101426>
- Alongi, D. M. (2012). Carbon sequestration in *mangrove* forests. In *Carbon Management* (Vol. 3, Issue 3). <https://doi.org/10.4155/cmt.12.20>
- Alongi, D. M. (2014). Carbon cycling and storage in *mangrove* forests. *Annual Review of Marine Science*, 6. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010213-135020>
- Alongi, D. M. (2020). Global Significance of *Mangrove* Blue Carbon in Climate Change Mitigation. *Sci*, 2(3). <https://doi.org/10.3390/sci2030067>
- Alves, A., Gersonius, B., Kapelan, Z., Vojinovic, Z., & Sanchez, A. (2019). Assessing the Co-Benefits of green-blue-grey infrastructure for sustainable urban flood risk management. *Journal of Environmental Management*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.036>
- Amad, F. S., Mohd Yunus, M. Z., Abd Wahab, A. K., Ibrahim, N., & Mohamad, I. I. (2021). Mapping the *Mangrove* Vulnerability Index Using Geographical Information System. *International Journal of Innovative Computing*, 11(1). <https://doi.org/10.11113/ijic.v11n1.309>
- Barr, J. G., Engel, V., Fuentes, J. D., Zieman, J. C., O'Halloran, T. L., Smith, T. J., & Anderson, G. H. (2010). Controls on *mangrove* forest-atmosphere carbon dioxide exchanges in western Everglades National Park. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 115(G2). <https://doi.org/10.1029/2009jg001186>
- Baumgartne, T., & Pahl-Wostl, C. (2013). UN-Water and its role in global water governance. *Ecology and Society*, 18(3). <https://doi.org/10.5751/ES-05564-180303>
- Beceiro, P., Brito, R. S., & Galvão, A. (2022). Assessment of the contribution of Nature-Based Solutions (NBS) to urban resilience: application to the case study of Porto. *Ecological Engineering*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106489>
- Beck, S., & Mahony, M. (2018). The IPCC and the new map of science and politics. In *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* (Vol. 9, Issue 6). <https://doi.org/10.1002/wcc.547>
- Bennouna, A., Document, G., E&Y, Hadadin, N., Qaqish, M., Akawwi, E., Bdour, A., Iv, T., Making, L., Happen, I., Yearbook, E. S., America, S., Council, W. E., Journal, I., Scientific, O. F., Lalzad, P., Morrison, J., Morikawa, M., Murphy, M., ... UN-Water. (2012). An Overview of the Global Water Problems and Solutions. *Water*, 301(5).
- Betts, R. A., Alfieri, L., Bradshaw, C., Caesar, J., Feyen, L., Friedlingstein, P., Gohar, L., Koutroulis, A., Lewis, K., Morfopoulos, C., Papadimitriou, L., Richardson, K. J., Tsanis, I., & Wyser, K. (2018). Changes in climate extremes, fresh water availability and vulnerability to food insecurity projected at 1.5°C and 2°C global warming with a higher-resolution global

- climate model. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376(2119). <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0452>
- Boano, C. (2009). Housing anxiety and multiple geographies in post-tsunami Sri Lanka. *Disasters*, 33(4). <https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.2009.01108.x>
- Boano, C., & García, M. (2011). Lost in translation? the challenges of an equitable post-disaster reconstruction process: Lessons from Chile. *Environmental Hazards*, 10(3). <https://doi.org/10.1080/17477891.2011.594493>
- Boudreau, K., Robinson, M., & Farooqi, Z. (2022). IPCC Sixth Assessment Report. *Canadian Journal of Emergency Management*, 2(1). <https://doi.org/10.25071/6sw6za31>
- Boyd, E. (2017). Climate adaptation: Holistic thinking beyond technology. In *Nature Climate Change* (Vol. 7, Issue 2). <https://doi.org/10.1038/nclimate3211>
- Boyd, E., Chaffin, B. C., Dorkenoo, K., Jackson, G., Harrington, L., N'Guetta, A., Johansson, E. L., Nordlander, L., Paolo De Rosa, S., Raju, E., Scown, M., Soo, J., & Stuart-Smith, R. (2021). Loss and damage from climate change: A new climate justice agenda. In *One Earth* (Vol. 4, Issue 10). <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.09.015>
- Bunting, P., Rosenqvist, A., Hilarides, L., Lucas, R. M., Thomas, N., Tadono, T., Worthington, T. A., Spalding, M., Murray, N. J., & Rebelo, L. M. (2022). Global *Mangrove* Extent Change 1996–2020: Global *Mangrove* Watch Version 3.0. *Remote Sensing*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/rs14153657>
- Caroline, J., & Kusuma, M. (2018). DESALINATION USING ACTIVATED CARBON FROM *MANGROVE* ROOTS. *International Journal of Advanced Research*, 6(3). <https://doi.org/10.21474/ijar01/6760>
- Carpentier, C. L., & Braun, H. (2020). Agenda 2030 for Sustainable Development: A powerful global framework. *Journal of the International Council for Small Business*, 1(1). <https://doi.org/10.1080/26437015.2020.1714356>
- Castellanos-Pérez, P. de J., Vázquez-Maldonado, L. E., Ávila, E., Cruz-Barraza, J. A., & Canales-Delgadillo, J. C. (2020). Diversity of *mangrove* root-dwelling sponges in a tropical coastal ecosystem in the southern Gulf of Mexico region. *Helgoland Marine Research*, 74(1). <https://doi.org/10.1186/s10152-020-00545-6>
- Cerralbo, P., Pedrera Balsells, M. F., Mestres, M., Fernandez, M., Espino, M., Grifoll, M., & Sanchez-Arcilla, A. (2019). Use of a hydrodynamic model for the management of water renovation in a coastal system. *Ocean Science*, 15(2). <https://doi.org/10.5194/os-15-215-2019>
- Chen, N., Hong, H., & Gao, X. (2021). Securing drinking water resources for a coastal city under global change: Scientific and institutional perspectives. *Ocean and Coastal Management*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.02.023>
- Costabel, S., Siemon, B., Houben, G., & Günther, T. (2017). Geophysical investigation of a freshwater lens on the island of Langeoog, Germany – Insights from combined HEM, TEM and MRS data. *Journal of Applied Geophysics*, 136. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.11.007>
- Costanza, R. (2003). The Early History of Ecological Economics and the International Society for Ecological Economics. *Internet Encyclopaedia of Ecological Economics*.
- Cunniff, S., & Schwartz, A. (2015). Performance of Natural Infrastructure and Nature-based Measures as Coastal Risk Reduction Features. *Environmental Defense Fund*, September.

- Cutter, S. L., Ismail-Zadeh, A., Alcántara-Ayala, I., Altan, O., Baker, D. N., Briceño, S., Gupta, H., Holloway, A., Johnston, D., McBean, G. A., Ogawa, Y., Paton, D., Porio, E., Silbereisen, R. K., Takeuchi, K., Valsecchi, G. B., Vogel, C., & Wu, G. (2015). Global risks: Pool knowledge to stem losses from disasters. In *Nature* (Vol. 522, Issue 7556).
<https://doi.org/10.1038/522277a>
- De Jong, M., Joss, S., Schraven, D., Zhan, C., & Weijnen, M. (2015). Sustainable-smart-resilient-low carbon-eco-knowledge cities; Making sense of a multitude of concepts promoting sustainable urbanization. *Journal of Cleaner Production*, 109.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.004>
- Duarte, C. M. (2015). Seafaring in the 21st century: The Malaspina 2010 circumnavigation expedition. In *Limnology and Oceanography Bulletin* (Vol. 24, Issue 1).
<https://doi.org/10.1002/lob.10008>
- Ellison, A. M., Farnsworth, E. J., & Twilley, R. R. (1996). Facultative mutualism between red *mangroves* and root-fouling sponges in belizean mangal. *Ecology*, 77(8).
<https://doi.org/10.2307/2265744>
- Ellison, A. M., Felson, A. J., & Friess, D. A. (2020). *Mangrove Rehabilitation and Restoration as Experimental Adaptive Management*. *Frontiers in Marine Science*, 7.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00327>
- Elmqvist, T., Maltby, E., Barker, T., Mortimer, M., Perrings, C., Aronson, J., De Groot, R., Fitter, A., Mace, G., Norberg, J., Sousa Pinto, I., Ring, I., Jax, K., Grimm, V., Leemans, R., & Salles, J. M. (2012). Biodiversity, ecosystems and ecosystem services. In *Taylor and Francis Ltd 5* (Vol. 9781849775489). <https://doi.org/10.4324/9781849775489>
- Environmental and Energy Study Institute. (2019). Nature as Resilient Infrastructure: An Overview of Nature-Based Solutions. *Environmental and Energy Study Institute (EESI)*, September 2019.
- Feng, C., Ye, G., Zeng, J., Zeng, J., Jiang, Q., He, L., Zhang, Y., & Xu, Z. (2023). Sustainably developing global blue carbon for climate change mitigation and economic benefits through international cooperation. *Nature Communications*, 14(1).
<https://doi.org/10.1038/s41467-023-41870-x>
- Freitas, R. F., Brauko, K. M., & Pagliosa, P. R. (2021). Relationships between *mangrove* root system and benthic macrofauna distribution. *Hydrobiologia*, 848(6).
<https://doi.org/10.1007/s10750-021-04538-5>
- Glavovic, B. (2023). Poverty and Inequity at Sea: Challenges for Ecological Economics. In *Ecological Economics of the Oceans and Coasts*.
<https://doi.org/10.4337/9781782542483.00019>
- Gleick, P. H. (2014). The Syrian conflict and the role of water. In *The World's Water* (Vol. 8).
https://doi.org/10.5822/978-1-61091-483-3_8
- Gleick, P. H., & Miller, R. W. (2002). The World's Water, 2000-2001 (Book). *Electronic Green Journal*.
- Harris, L. M. (2005). Negotiating Inequalities: Democracy, Gender and Politics of Difference in Water User Groups of Southeastern Turkey. In *Environmentalism in Turkey*.
- Harris, L. M. (2017). Political ecologies of the state: Recent interventions and questions going forward. In *Political Geography* (Vol. 58). <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2017.03.006>
- Harris, L. M., & Hazen, H. D. (2006). Power of maps: (Counter) Mapping for conservation. In *ACME* (Vol. 4, Issue 1).

- Hartog, N., & Stuyfzand, P. J. (2017). Water quality considerations on the rise as the use of managed aquifer recharge systems widens. *Water (Switzerland)*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/w9100808>
- Hebelstrup, K. H., Sagnelli, D., & Blennow, A. (2015). The future of starch bioengineering: GM microorganisms or GM plants? *Frontiers in Plant Science*, 6(APR). <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00247>
- Hielkema, T. W., Schipper, C. A., & Gersonius, B. (2023). Global nature conservation and the apparent ineffective adaptation to climate pressures. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 26(2). <https://doi.org/10.14321/ae hm.026.02.033>
- Hongwiset, S., Rodtassana, C., Pongparn, S., Umnouysin, S., & Suchewaboripont, V. (2022). Synergetic Roles of *Mangrove* Vegetation on Sediment Accretion in Coastal *Mangrove* Plantations in Central Thailand. *Forests*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/f13101739>
- Houben, G. J., Koeniger, P., & Sültenfuß, J. (2014). Freshwater lenses as archive of climate, groundwater recharge, and hydrochemical evolution: Insights from depth-specific water isotope analysis and age determination on the island of Langeoog, Germany. *Water Resources Research*, 50(10). <https://doi.org/10.1002/2014WR015584>
- Huang, Z., Yuan, X., & Liu, X. (2021). The key drivers for the changes in global water scarcity: Water withdrawal versus water availability. *Journal of Hydrology*, 601. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126658>
- Huq, S. (2008). Comment: How to adapt to climate change. *New Scientist*, 197(2649). [https://doi.org/10.1016/s0262-4079\(08\)60772-1](https://doi.org/10.1016/s0262-4079(08)60772-1)
- Huq, S. (2011). Lessons of climate change, stories of solutions. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 67(1). <https://doi.org/10.1177/0096340210393925>
- Huq, S., & Khan, M. R. (2019). Equity in National Adaptation Programs of Action (NAPAs): The Case of Bangladesh. In *Fairness in Adaptation to Climate Change*. <https://doi.org/10.7551/mitpress/2957.003.0015>
- Huxham, M., Whitlock, D., Githaiga, M., & Dencer-Brown, A. (2018). Carbon in the coastal seascape: How interactions between *mangrove* forests, seagrass meadows and tidal marshes influence carbon storage. *Current Forestry Reports*, 4(2). <https://doi.org/10.1007/s40725-018-0077-4>
- Ilala, M., Wihardjo, S. D., & Purwanto, A. (2021). The Relationship of Ecological Intelligence with Students' Environment Care Behavior on *Mangrove* Ecosystem Materials. *International Journal of Multicultural and Multireligious Understanding*, 8(10). <https://doi.org/10.18415/ijmmu.v8i10.3131>
- IPCC. (2014). Alterações Climáticas 2014: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade-Resumo para Decisores. *Contribuição Do Grupo de Trabalho II Para o Quinto Relatório de Avaliação Do Painel Intergovernamental Sobre Alterações Climáticas*.
- Irsadi, N. K. dan A. (2014). PERANAN MANGROVE SEBAGAI BIOFILTER PENCEMARAN AIR WILAYAH TAMBAK BANDENG TAPAK, SEMARANG (Role of *Mangrove* as Water Pollution Biofilter in Milkfish Pond, Tapak, Semarang). *Jurnal Manusia Dan Lingkungan*, 21(2).
- Jacob, K., Binder, M., & Wiecezorek, A. (2004). Proceedings of the 2002 Berlin Conference on the Human Dimensions of Global Environmental Change "Knowledge for the Sustainability Transition. The Challenge for Social Science". In *FFU report 03–2004*.

- Junarto, R. (2023). Mitigasi Perubahan Iklim dan Dampak Pengelolaan Sumber Daya Agraria: Wawasan dari Indonesia. *Tunas Agraria*, 6(3), 237–254.
<https://doi.org/10.31292/jta.v6i3.219>
- Kato, F., & Tajima, Y. (2023). Coastal adaptation to climate change in Japan: a review. *Coastal Engineering Journal*, 65(4). <https://doi.org/10.1080/21664250.2023.2259187>
- Kazemi, A., Castillo, L., & Curet, O. M. (2021). *Mangrove roots model suggest an optimal porosity to prevent erosion. Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88119-5>
- Kazemi, A., Evans, H. B., Van De Riet, K., Castillo, L., & Curet, O. M. (2019). Hydrodynamics of *Mangrove Roots and its Applications in Coastal Protection. OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston, OCEAN 2018*. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2018.8604931>
- Kazemi, A., Van De Riet, K., & Curet, O. M. (2017). Hydrodynamics of *mangrove-type root models: The effect of porosity, spacing ratio and flexibility. Bioinspiration and Biomimetics*, 12(5). <https://doi.org/10.1088/1748-3190/aa7ccf>
- Khan, M. S., & Paul, S. K. (2023). Fresh water management in coastal Bangladesh: preparedness and adaptation. *Discover Water*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s43832-023-00052-y>
- Kim, K., Seo, E., Chang, S. K., Park, T. J., & Lee, S. J. (2016). Novel water filtration of saline water in the outermost layer of *mangrove roots. Scientific Reports*, 6.
<https://doi.org/10.1038/srep20426>
- Kimura, M., & Wada, H. (1989). Tannins in *mangrove tree roots and their role in the root environment. Soil Science and Plant Nutrition*, 35(1).
<https://doi.org/10.1080/00380768.1989.10434741>
- Koropitan, A. F., Barus, T. A., & Cordova, M. R. (2021). Coastal Water Properties And Hydrodynamic Processes In The Malacca Strait: Case Study Northeastern Coast Of Sumatra, Indonesia. *Journal of Ecological Engineering*, 22(11).
<https://doi.org/10.12911/22998993/142974>
- Kuwae, T., & Crooks, S. (2021). Linking climate change mitigation and adaptation through coastal green–gray infrastructure: a perspective. *Coastal Engineering Journal*, 63(3).
<https://doi.org/10.1080/21664250.2021.1935581>
- Lall, U. (2014). Debates-The future of hydrological sciences: A (common) path forward? One water. One world. Many climes. Many souls. In *Water Resources Research* (Vol. 50, Issue 6). <https://doi.org/10.1002/2014WR015402>
- Le Gouvello, R., Cohen-Shacham, E., Herr, D., Spadone, A., Simard, F., & Brugere, C. (2023). The IUCN Global Standard for Nature-based Solutions™ as a tool for enhancing the sustainable development of marine aquaculture. *Frontiers in Marine Science*, 10.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1146637>
- Lee, J. S., & Choi, H. Il. (2018). Comparison of flood vulnerability assessments to climate change by construction frameworks for a composite indicator. *Sustainability (Switzerland)*, 10(3).
<https://doi.org/10.3390/su10030768>
- Lestari, K., Agustien, A., & Djamaan, A. (2019). The Potential of Endophytic Fungi Isolated from Leaves, Stems, *Mangrove Roots Avicennia marina* as a Producer of Antibiotics. *Metamorfosa: Journal of Biological Sciences*, 6(1).
<https://doi.org/10.24843/metamorfosa.2019.v06.i01.p13>

- Li, S., Leitão, J. P., Wang, Z., & Bach, P. M. (2024). A drainage network-based impact matrix to support targeted blue-green-grey stormwater management solutions. *Science of the Total Environment*, 912. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168623>
- Ling, Z., Shu, L., Sun, Y., Wang, R., & Li, Y. (2021). Impact of island urbanization on freshwater lenses: A case study on a small coral island. *Water (Switzerland)*, 13(22). <https://doi.org/10.3390/w13223272>
- Lovelock, C. E., & Brown, B. M. (2019). Land tenure considerations are key to successful mangrove restoration. In *Nature Ecology and Evolution* (Vol. 3, Issue 8). <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0942-y>
- Lovelock, C. E., Friess, D. A., Kauffman, J. B., & Fourqurean, J. W. (2018). Human Impacts on Blue Carbon Ecosystems. In *A Blue Carbon Primer*. <https://doi.org/10.1201/9780429435362-3>
- Lovelock, C. E., Simpson, L. T., Duckett, L. J., & Feller, I. C. (2015). Carbon budgets for Caribbean mangrove forests of varying structure and with phosphorus enrichment. *Forests*, 6(10). <https://doi.org/10.3390/f6103528>
- Lu, P., Sun, Y., & Steffen, N. (2023). Scenario-based performance assessment of green-grey-blue infrastructure for flood-resilient spatial solution: A case study of Pazhou, Guangzhou, greater Bay area. *Landscape and Urban Planning*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104804>
- M'Ikiugu, M. M., QianNa, W., & Kinoshita, I. (2012). Green Infrastructure Gauge: A Tool for Evaluating Green Infrastructure Inclusion in Existing and Future Urban Areas. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 68. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.12.269>
- Mach, K. J., & Siders, A. R. (2021). Reframing strategic, managed retreat for transformative climate adaptation. In *Science* (Vol. 372, Issue 6548). <https://doi.org/10.1126/science.abh1894>
- Macreadie, P. I., Anton, A., Raven, J. A., Beaumont, N., Connolly, R. M., Friess, D. A., Kelleway, J. J., Kennedy, H., Kuwae, T., Lavery, P. S., Lovelock, C. E., Smale, D. A., Apostolaki, E. T., Atwood, T. B., Baldock, J., Bianchi, T. S., Chmura, G. L., Eyre, B. D., Fourqurean, J. W., ... Duarte, C. M. (2019). The future of Blue Carbon science. In *Nature Communications* (Vol. 10, Issue 1). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11693-w>
- Macreadie, P. I., Robertson, A. I., Spinks, B., Adams, M. P., Atchison, J. M., Bell-James, J., Bryan, B. A., Chu, L., Filbee-Dexter, K., Drake, L., Duarte, C. M., Friess, D. A., Gonzalez, F., Grafton, R. Q., Helmstedt, K. J., Kaebernick, M., Kelleway, J., Kendrick, G. A., Kennedy, H., ... Rogers, K. (2022). Operationalizing marketable blue carbon. In *One Earth* (Vol. 5, Issue 5). <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.04.005>
- McSherry, M., Davis, R. P., Andradi-Brown, D. A., Ahmadi, G. N., Van Kempen, M., & Wingard Brian, S. (2023). Integrated mangrove aquaculture: The sustainable choice for mangroves and aquaculture? *Frontiers in Forests and Global Change*, 6. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1094306>
- Milewski, A., Sultan, M., Al-Dousari, A., & Yan, E. (2014). Geologic and hydrologic settings for development of freshwater lenses in arid lands. *Hydrological Processes*, 28(7). <https://doi.org/10.1002/hyp.9823>

- Min, Z. Y., Bhaktikul, K., Aroonsrimorakot, S., Sucharitakul, S., Tabucanon, A. S., & Siswoyo, B. E. (2020). Factors related to coastal communities' water-related natural disaster awareness, preparedness, resilience and recovery in three cyclone nargis affected areas in the ayeeyarwaddy delta region, Myanmar. *Environment and Natural Resources Journal*, 18(3). <https://doi.org/10.32526/enrj.18.3.2020.29>
- Mishra, R. K. (2023). Fresh Water availability and Its Global challenge. *British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies*, 4(3). <https://doi.org/10.37745/bjmas.2022.0208>
- Mitsch, W. J., & Hernandez, M. E. (2013). Landscape and climate change threats to wetlands of North and Central America. *Aquatic Sciences*, 75(1). <https://doi.org/10.1007/s00027-012-0262-7>
- Mitsch, W. J., Lefeuvre, J. C., & Bouchard, V. (2002). Ecological engineering applied to river and wetland restoration. In *Ecological Engineering* (Vol. 18, Issue 5). [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(02\)00018-6](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(02)00018-6)
- Morris, R. L., Bilkovic, D. M., Walles, B., & Strain, E. M. A. (2022). Nature-based coastal defence: Developing the knowledge needed for wider implementation of living shorelines. *Ecological Engineering*, 185. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106798>
- Morris, R. L., Konlechner, T. M., Ghisalberti, M., & Swearer, S. E. (2018). From grey to green: Efficacy of eco-engineering solutions for nature-based coastal defence. In *Global Change Biology* (Vol. 24, Issue 5). <https://doi.org/10.1111/gcb.14063>
- Murdiyarso, D. (2003). Sepuluh Tahun Perjalanan Negosiasi Konvensi Perubahan Iklim. *Onesearch.id*.
- Murdiyarso, D. (2010). Climate and development-The challenges in delivering the promises: An editorial essay. In *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* (Vol. 1, Issue 6). <https://doi.org/10.1002/wcc.19>
- Murdiyarso, D., Purbopuspito, J., Kauffman, J. B., Warren, M. W., Sasmito, S. D., Donato, D. C., Manuri, S., Krisnawati, H., Taberima, S., & Kurnianto, S. (2015). The potential of Indonesian *mangrove* forests for global climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 5(12). <https://doi.org/10.1038/nclimate2734>
- Murdiyarso, D., Sasmito, S. D., Sillanpää, M., MacKenzie, R., & Gaveau, D. (2021). *Mangrove* selective logging sustains biomass carbon recovery, soil carbon, and sediment. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91502-x>
- Murdiyarso, D., Soerawidjaya, T. H., Supriatna, J., Sukara, E., & Winarto, Y. T. (2020). Meninjau Kembali Kebijakan Alih-Guna Lahan dan Keberkelanjutan Sektor Sawit di Indonesia. *Akademi Ilmu Pengetahuan Indonesia*, 1.
- Muzaki, F. K., Saptarini, D., & Ibadah, A. S. (2019). Juvenile and small fish diversity in *mangroves* of different root types in the Labuhan coastal area, Bangkalan, Indonesia. *Biodiversitas*, 20(6). <https://doi.org/10.13057/biodiv/d200607>
- Nana Kariada T.M dan Andin Irsadi. (2014). PERANAN MANGROVE SEBAGAI BIOFILTER PENCEMARAN AIR WILAYAH TAMBAK BANDENG TAPAK, SEMARANG (Role of *Mangrove* as Water Pollution Biofilter in Milkfish Pond, Tapak, Semarang). *Jurnal Manusia Dan Lingkungan*, 21(2).
- Narendr, A., Vinay, S., Aithal, B. H., & Das, S. (2022). Multi-dimensional parametric coastal flood risk assessment at a regional scale using GIS. *Environment, Development and Sustainability*, 24(7). <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01839-6>

- Nicholls, R. J., Whitehead, P., Wolf, J., Rahman, M., & Salehin, M. (2015). The Ganges-Brahmaputra-Meghna delta system: biophysical models to support analysis of ecosystem services and poverty alleviation. In *Environmental Science: Processes and Impacts* (Vol. 17, Issue 6). <https://doi.org/10.1039/c5em90022k>
- Oates, L., Dai, L., Sudmant, A., & Gouldson, A. (2020). Building climate resilience and water security in cities: Lessons from the sponge city of Wuhan, China. *Coalition for Urban Transitions*.
- Ola, A., Gauthier, A. R. G., Xiong, Y., & Lovelock, C. E. (2019). The roots of blue carbon: Responses of *mangrove* stilt roots to variation in soil bulk density. *Biology Letters*, 15(4). <https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0866>
- Ola, A., & Lovelock, C. E. (2021). Decomposition of *mangrove* roots depends on the bulk density they grew in. *Plant and Soil*, 460(1–2). <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04791-y>
- Olwig, M. F., Sørensen, M. K., Rasmussen, M. S., Danielsen, F., Selvam, V., Hansen, L. B., Nyborg, L., Vestergaard, K. B., Parish, F., & Karunakaran, V. M. (2007). Using remote sensing to assess the protective role of coastal woody vegetation against tsunami waves. *International Journal of Remote Sensing*, 28(13–14). <https://doi.org/10.1080/01431160701420597>
- Orff, K. (2013). Shellfish as Living Infrastructure. *Ecological Restoration*, 31(3). <https://doi.org/10.3368/er.31.3.317>
- Orff, K., & Ovink, H. (2023). Dialogue on Values, Design, Practice, and the Future. *Journal of Delta Urbanism*, 4. <https://doi.org/10.59490/jdu.4.2023.7350>
- Ostrom, E. (2020). Elinor ostrom speaks about property rights. *Journal of Private Enterprise*, 35(3).
- Ouyang, X., Lee, S. Y., & Connolly, R. M. (2017). The role of root decomposition in global *mangrove* and saltmarsh carbon budgets. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 166). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.01.004>
- Paxton, A. B., Riley, T. N., Steenrod, C. L., Smith, C. S., Zhang, Y. S., Gittman, R. K., Silliman, B. R., Buckel, C. A., Viehman, T. S., Puckett, B. J., & Davis, J. (2023). What evidence exists on the performance of nature-based solutions interventions for coastal protection in biogenic, shallow ecosystems? A systematic map protocol. *Environmental Evidence*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s13750-023-00303-4>
- Pérez-López, M. E., Arreola-Ortiz, A. E., & Malagón Zamora, P. (2018). Evaluation of detergent removal in artificial wetlands (biofilters). *Ecological Engineering*, 122. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.07.036>
- Port, K. J. N. (2023). Nature-based solutions for future earth: harnessing the power of ecosystems. *MOJ Ecology & Environmental Sciences*, 8(6). <https://doi.org/10.15406/mojes.2023.08.00295>
- Postel, S. (2017). Replenish: The virtuous cycle of water and prosperity. In *Replenish: The Virtuous Cycle of Water and Prosperity*. <https://doi.org/10.5822/978-1-61091-791-9>
- Preti, F., Capobianco, V., & Sangalli, P. (2022). Soil and Water Bioengineering (SWB) is and has always been a nature-based solution (NBS): a reasoned comparison of terms and definitions. *Ecological Engineering*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106687>
- Psuty, N. P., & Silveira, T. M. (2010). Global climate change: An opportunity for coastal dunes?? *Journal of Coastal Conservation*, 14(2). <https://doi.org/10.1007/s11852-010-0089-0>

- Raub, K. B., Stepenuck, K. F., Panikkar, B., & Stephens, J. C. (2021). An analysis of resilience planning at the nexus of food, energy, water, and transportation in coastal US cities. *Sustainability (Switzerland)*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/su13116316>
- Rauch, H. P., von der Thannen, M., Raymond, P., Mira, E., & Evette, A. (2022). Ecological challenges* for the use of soil and water bioengineering techniques in river and coastal engineering projects. *Ecological Engineering*, 176. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106539>
- Raworth, K. (2016). Doughnut Economics : Seven Ways to Think Like a 21st-Century Economist- Kate Raworth. In *Chelsea Green Publishing* (Vol. 38, Issue 1).
- Raworth, K. (2018). A healthy economy should be designed to thrive, not grow. In *Ted*.
- Rockström, J., & Sukhdev, P. (2016). How food connects all the SDGs-Stockholm Resilience Centre. In *Stockholm Resilience Centre*.
- Rodin, J. (2013). Accelerating action towards universal health coverage by applying a gender lens. *Bulletin of the World Health Organization*, 91(9). <https://doi.org/10.2471/BLT.13.127027>
- Ronco, P., Gallina, V., Torresan, S., Zabeo, A., Semenzin, E., Critto, A., & Marcomini, A. (2014). The KULTURisk Regional Risk Assessment methodology for water-related natural hazards- Part 1: Physical-environmental assessment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(12). <https://doi.org/10.5194/hess-18-5399-2014>
- Roukounis, C. N., & Tsihrintzis, V. A. (2022). Indices of Coastal Vulnerability to Climate Change: a Review. In *Environmental Processes* (Vol. 9, Issue 2). <https://doi.org/10.1007/s40710-022-00577-9>
- Roy, J., Islam, S. T., & Pal, I. (2021). Implementation framework for sustainable development: What matters in the context of Bangladesh. *International Energy Journal*, 21.
- RSC. (2008). Special issue of Forced Migration Review on Climate Change and Displacement. *Forced Migration Review-Refugee Studies Centre-Oxford Department of International Development*, 31.
- Sachs, J. D. (2005). Achieving the Millennium Development Goals — The Case of Malaria. *New England Journal of Medicine*, 352(2). <https://doi.org/10.1056/nejmp048319>
- Saddaf, N., Sultana, R., & Anjum, B. (2024). Vulnerability and effectiveness of nature-based solutions (NbS) in the farming communities of coastal Bangladesh. *Environmental Challenges*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100863>
- Sajeev, S., Muthukumar, P., & Selvam, S. (2023). Submarine groundwater discharge: An Asian overview. *Chemosphere*, 325. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138261>
- Santos da Silva, J. (2023). COLMEIA DIGITAL: GÊNESIS BUSINESS CANVAS. *Revista Formadores*, 20(Suplementar). <https://doi.org/10.25194/rf.v20isuplementar.1798>
- Savenije, H. H. G., Hoekstra, A. Y., & Van Der Zaag, P. (2014). Evolving water science in the Anthropocene. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(1). <https://doi.org/10.5194/hess-18-319-2014>
- Schlager, E. (2005). Rivers for Life: Managing water for people and nature. *Ecological Economics*, 55(2). <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.08.004>
- Schueler, K. (2017). Nature-based solutions to enhance coastal resilience. *Idb*.

- Siddiq, A., Dimiyati, M., & Damayanti, A. (2020). Analysis of Carbon Stock Distribution of *Mangrove* Forests in The Coastal City of Benoa, Bali with Combination Vegetation Index, and Statistics Approach. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 10(6). <https://doi.org/10.18517/ijaseit.10.6.12991>
- Soanes, L. M., Pike, S., Barker, D., Butt, C., John, L., Medcalf, K., Naumann, E., Rouse, C., Samuel, C. A., & Mukhida, F. (2023). Opportunity mapping for nature-based solutions: Mitigating storm surge and land erosion in the Caribbean. *Nature-Based Solutions*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2023.100095>
- Sofyan A.P, A. B., S. Tabbu, M. A., Adawiyah, M., & Ramadhani, A. P. (2023). Kajian Pemenuhan Kebutuhan Air Bersih Masyarakat Pesisir Kecamatan Abeli dan Nambo Kota Kendari. *LaGeografia*, 21(2). <https://doi.org/10.35580/lageografia.v21i2.43120>
- Sowińska-Świerkosz, B., & García, J. (2022). What are Nature-based solutions (NBS)? Setting core ideas for concept clarification. *Nature-Based Solutions*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2022.100009>
- Srikanth, S., Lum, S. K. Y., & Chen, Z. (2016). *Mangrove* root: adaptations and ecological importance. In *Trees-Structure and Function* (Vol. 30, Issue 2). <https://doi.org/10.1007/s00468-015-1233-0>
- Stewart, H. A., Janiak, D. S., Wright, J. L., Hunt, D. A. G. A., Cortes, A. C., Powell, K. T., Chapman, L. J., & Altieri, A. H. (2022). Epibiont community composition of red *mangroves* Rhizophora mangle are contingent on root characteristics. *Marine Ecology Progress Series*, 686. <https://doi.org/10.3354/meps13999>
- Strain, E. M. A., Kompas, T., Boxshall, A., Kelvin, J., Swearer, S., & Morris, R. L. (2022). Assessing the coastal protection services of natural *mangrove* forests and artificial rock revetments. *Ecosystem Services*, 55. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101429>
- Sui, J., He, X., Yi, G., Zhou, L., Liu, S., Chen, Q., Xiao, X., & Wu, J. (2023). Diversity and structure of the root-associated bacterial microbiomes of four *mangrove* tree species, revealed by high-throughput sequencing. *PeerJ*, 11. <https://doi.org/10.7717/peerj.16156>
- Sun, D., Wang, M., & Feng, P. (2023). Numerical simulation for strip-island freshwater lenses involving a precipitation-fed freshwater table. *Journal of Contaminant Hydrology*, 259. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2023.104242>
- Szymkiewicz, A., Gumuła-Kawęcka, A., Šimunek, J., Leterme, B., Beegum, S., Jaworska-Szulc, B., Pruszkowska-Caceres, M., Gorczewska-Langner, W., Angulo-Jaramillo, R., & Jacques, D. (2018). Simulations of freshwater lens recharge and salt/freshwater interfaces using the HYDRUS and SWI2 packages for MODFLOW. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66(2). <https://doi.org/10.2478/johh-2018-0005>
- TAMURA, T. (2020). Toward Analytical Approach Related to Wind. *Wind Engineers, JAWE*, 45(4). <https://doi.org/10.5359/jawe.45.271>
- Thompson, B. S. (2018). The political ecology of *mangrove* forest restoration in Thailand: Institutional arrangements and power dynamics. *Land Use Policy*, 78. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.07.016>
- Toste, R., Rosman, P. C. C., & de Freitas, M. A. V. (2017). Saline Intrusion Response to Sea Level Rise and Its Implications on Water and Coastal Management: A Case Study in Brazil. *Journal of Water Resource and Protection*, 09(05). <https://doi.org/10.4236/jwarp.2017.95033>

- Twilley, R. R., & Rivera-Monroy, V. H. (2009). Ecogeomorphic models of nutrient biogeochemistry for *mangrove* wetlands. In *Coastal wetlands: an integrated ecosystem approach*.
- UNEP. (2017). Frontiers 2017-Emerging Issues Of Environmental Concern. In *UN Environment*.
- UNESCO. (2021). UN World Water Development Report 2021 | UN-Water. *UN World Water Development Report 2021*.
- UNESCO for UN-Water. (2023). Imminent risk of a global water crisis (UNESCO/UN-Water). *Cambridge Prisms: Water*, 1.
- United Nation. (2023). *Water Facts | UN-Water*. Organización de Las Naciones Unidas.
- United Nations Water. (2020). Quality and Wastewater | UN-Water. In *United Nations-UN Water*.
- UNW-DPAC. (2015). Integrated Water Resources Management Reader: UN-Water Decade Programme on Advocacy and Communication (UNW-DPAC). *United Nations Office to Support the International Decade for Action 'Water for Life' 2005-2015*.
- Vandenbohede, A., & Lebbe, L. (2006). Occurrence of salt water above fresh water in dynamic equilibrium in a coastal groundwater flow system near De Panne, Belgium. *Hydrogeology Journal*, 14(4). <https://doi.org/10.1007/s10040-005-0446-5>
- Warner, K. (2009). Migration: Climate adaptation or failure to adapt? Findings from a global comparative field study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 6(56). <https://doi.org/10.1088/1755-1307/6/56/562006>
- Wehrli, B. (2013). Biogeochemistry: Conduits of the carbon cycle. In *Nature* (Vol. 503, Issue 7476). <https://doi.org/10.1038/503346a>
- Wheater, H., & Gober, P. (2013). Water security in the Canadian Prairies: Science and management challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(2002). <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0409>
- Wheater, H. S., & Gober, P. (2015). Water security and the science agenda. *Water Resources Research*, 51(7). <https://doi.org/10.1002/2015WR016892>
- WHO. (2017). Financing universal water, sanitation and hygiene under the sustainable development goals. UN-Water Global Analysis and Assessment of Sanitation and Drinking-Water. *World Health Organization*.
- Wine, M. L., & Hendrickx, J. M. H. (2013). Biohydrologic effects of eastern redcedar encroachment into grassland, Oklahoma, USA. *Biologia (Poland)*, 68(6). <https://doi.org/10.2478/s11756-013-0252-9>
- Wolanski, E., Boorman, L. A., Chícharo, L., Langlois-Saliou, E., Lara, R., Plater, A. J., Uncles, R. J., & Zalewski, M. (2004). Ecohydrology as a new tool for sustainable management of estuaries and coastal waters. In *Wetlands Ecology and Management* (Vol. 12, Issue 4). <https://doi.org/10.1007/s11273-005-4752-4>
- World Health Organization; UN-Water. (2014). WHO | UN-water GLAAS 2014 Report. *Un Glass*, 1(1).
- Zhang, Y., Xiao, L., Guan, D., Chen, Y., Motelica-Heino, M., Peng, Y., & Lee, S. Y. (2021). The role of *mangrove* fine root production and decomposition on soil organic carbon component ratios. *Ecological Indicators*, 125. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107525>

PROFIL PENULIS

Dr. Bokiraiya Latuamury, M.Sc.



Penulis merupakan akademisi terkemuka dan pemikir visioner dalam bidang kehutanan dan ilmu lingkungan, yang visi keilmuan dan ketajaman empirisnya telah membentuk wacana strategis mengenai solusi berbasis alam (*nature-based solutions*) untuk ketahanan iklim, khususnya pada ekosistem pulau-pulau kecil dan wilayah pesisir. Saat ini, beliau menjabat sebagai dosen senior pada Program Studi Kehutanan dan Ilmu Lingkungan, Fakultas Pertanian, Universitas Pattimura, Indonesia. Ia menghadirkan sintesis langka antara ketelitian ilmiah, integrasi pengetahuan adat, dan inovasi terapan. Perjalanan akademiknya yang menonjol dan komitmennya terhadap keadilan ekologis serta pembangunan berkelanjutan menjadi fondasi intelektual dari buku monumental *Air dan Akar Mangrove: Infrastruktur Alami untuk Masa Depan Ketahanan Pesisir*.

Menempuh pendidikan tinggi di Universitas Hasanuddin (S.Hut.), dan kemudian melanjutkan pendidikan pascasarjana hingga tingkat doktoral di Universitas Gadjah Mada (M.Sc. dan Ph.D.), Dr. Latuamury mengkhususkan diri dalam bidang ekohidrologi, tata kelola daerah aliran sungai, serta manajemen adaptif di pulau-pulau kecil. Kontribusi ilmiahnya mencakup publikasi dalam jurnal bereputasi yang terindeks Scopus, serta keterlibatannya dalam penelitian-penelitian kebijakan mengenai adaptasi iklim, ketahanan sumber daya air, dan pemodelan sosio-hidrologi. Ia juga merupakan perancang utama dari *Platform NetSyMoD*—sebuah sistem pendukung keputusan integratif untuk distribusi air yang adil.

Rekam jejak akademiknya mencerminkan rentang tematik interdisipliner yang luas, mulai dari hidrologi lingkungan, tata kelola sumberdaya air, Manajemen DAS pulau-pulau kecil hingga hutan kota, serta beberapa publikasi kebencanaan yang inklusif gender. Ia telah menulis sejumlah buku ajar dan referensi yang banyak digunakan di perguruan tinggi dan menjadi acuan kebijakan di tingkat nasional. Gaya pengajarannya didasarkan pada pendekatan berpikir sistemik, analisis berbasis data, dan penghargaan yang mendalam terhadap pengetahuan ekologis lokal—yang menjadikannya tokoh kunci dalam riset transdisipliner di kawasan Global East South. Melalui keterlibatan aktif dalam berbagai forum ilmiah, beliau menjembatani pemikiran akademik dengan ketahanan komunitas, memastikan bahwa inovasi ilmiah tetap inklusif, kontekstual, dan berdampak luas.

Buku ini merupakan refleksi sekaligus puncak dari dedikasi panjang Dr. Latuamury dalam riset dan pengabdian. Ia meyakini bahwa masa depan ketahanan pesisir tidak terletak pada beton dan baja, melainkan dalam kompleksitas elegen sistem perakaran hidup. Sebagai ilmuwan, pendidik, dan penggiat kebijakan, warisannya tergambar dalam peta jalan ketahanan bumi—berakar pada kearifan lokal, namun menjangkau cakrawala global.

Air dan Akar *Mangrove*: Infrastruktur Alami untuk Masa Depan Ketahanan Pesisir merupakan karya referensi multidisipliner yang mengangkat akar *mangrove* sebagai infrastruktur alami strategis dalam menghadapi krisis air dan perubahan iklim global. Buku ini menandai lompatan konseptual dalam literatur keberlanjutan dengan mengintegrasikan pendekatan biohidrologi, rekayasa ekosistem, kebijakan adaptif, dan kearifan lokal dalam satu narasi ilmiah yang terpadu. Dengan mengedepankan *novelty* berbasis kecerdasan ekologis akar *mangrove*, buku ini tidak hanya menjelaskan fungsi ekologis sistem akar, tetapi juga menggagas akar sebagai modul bio-teknologis dalam desain infrastruktur hijau-biru yang responsif dan tangguh terhadap dinamika pesisir.

Bab-bab awal membuka diskursus mengenai keterbatasan sistem infrastruktur abu-abu konvensional dalam merespons tekanan hidrometeorologis di wilayah pesisir, dan memperkenalkan akar *mangrove* sebagai jaringan biohidrologi alami yang mampu melakukan filtrasi, infiltrasi, dan regulasi salinitas secara efisien. Dalam kerangka transisi dari rekayasa keras menuju solusi berbasis alam (*Nature-based Solutions*), akar *mangrove* dikemukakan sebagai sistem *bio-engineered* yang tidak hanya menopang vegetasi, tetapi juga menjalankan fungsi drainase, penyimpanan, dan penyaring air dalam lanskap dinamis. Melalui telaah biofisika dan anatomi vegetatif, buku ini mengklasifikasikan morfologi akar *mangrove* seperti akar napas, sebagai struktur arsitektural mikro yang membentuk jaringan kapiler biologis dengan efisiensi ekohidrologis tinggi.

Dimensi sosial-ekologis dikaji melalui lensa *socio-hydrological interface* yang mengeksplorasi persepsi lokal, praktik tradisional, dan pengetahuan etnohidrologi masyarakat pesisir mengenai akar *mangrove*. Studi kasus dari Indonesia, Filipina, dan kawasan Asia Tenggara memperkaya narasi dengan bukti empiris bahwa akar *mangrove* telah lama diinternalisasi sebagai bagian dari sistem adaptasi komunitas terhadap ketidakpastian hidrologis dan perubahan lingkungan. Aspek tata kelola dan kebijakan publik dijabarkan secara mendalam, dengan penekanan pada strategi pengarusutamaan akar *mangrove* dalam dokumen perencanaan seperti RPJM, RZWP3K, serta dalam kerangka kerja REDD+, SDGs, dan mekanisme PES. Buku ini juga menyuguhkan pendekatan kelembagaan adaptif dan inovasi tata kelola berbasis data spasial serta teknologi pemantauan akar *mangrove* yang partisipatif. Menutup keseluruhan uraian, buku ini menyajikan visi futuristik melalui konsep *Intelligent Root System (IRS)*—yakni sistem infrastruktur akar yang terintegrasi *big data* ekohidrologis, sebagai model transformatif dalam pengembangan *eco-smart infrastructure* untuk pesisir. Pendekatan ini memperluas horizon perencanaan berbasis ekosistem menuju masa depan ketahanan air dan keadilan ekologis yang berkelanjutan. Sebagai buku referensi utama, karya ini diharapkan menjadi acuan strategis bagi akademisi, teknokrat, perencana wilayah, dan pembuat kebijakan dalam merancang masa depan pesisir yang resilien, berakar pada sistem alami, dan berorientasi global.



SCANME

www.penerbitwidina.com
@penerbitwidina
penerbit widina
penerbitwidina@gmail.com
widina store
widina bookstore
Layanan Pembaca & Penjualan Buku
0815-7000-699

Ilmu Alam - Rp. 92.300

ISBN 978-634-246-038-2



9

786342

460382