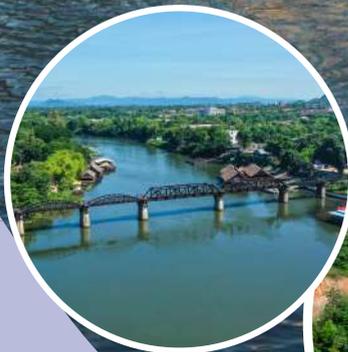


TEKNIK SUNGAI BERKELANJUTAN

PENULIS:

- Amrullah Mansida
- Azizah Rokhmawati
- Farida Gaffar
- Ady Purnama
- Ganisa Elsina Salamena
- Imam Rohani
- Mahmuddin



TEKNIK SUNGAI BERKELANJUTAN

**Amrullah Mansida
Azizah Rokhmawati
Farida Gaffar
Ady Purnama
Ganisa Elsina Salamena
Imam Rohani
Mahmuddin**



GET PRESS INDONESIA

TEKNIK SUNGAI BERKELANJUTAN

Penulis :

Amrullah Mansida
Azizah Rokhmawati
Farida Gaffar
Ady Purnama
Ganisa Elsina Salamena
Imam Rohani
Mahmuddin

ISBN : 978-623-125-637-9

Editor : Mila Sari, M.Si.,

Penyunting : Dede Aulia Ahsani, S.T.

Desain Sampul dan Tata Letak : Atyka Trianisa, S.Pd

Penerbit : GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi :

Jln. Palarik Air Pacah No 26 Kel. Air Pacah
Kec. Koto Tangah Kota Padang Sumatera Barat

Website : www.getpress.co.id

Email : adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Februari 2025

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan
dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT dalam segala kesempatan. Sholawat beriring salam dan doa kita sampaikan kepada Nabi Muhammad SAW. Alhamdulillah atas Rahmat dan Karunia-Nya penulis telah menyelesaikan Buku Teknik Sungai Berkelanjutan ini.

Buku Ini Membahas Pengantar - Bidang Teknik Sungai Yang Berkembang, Praktik Pengelolaan Sungai Yang Berkelanjutan, Ketahanan Dalam Teknik Sungai, Integrasi Jasa Ekosistem Dalam Teknik Sungai, Manajemen Banjir Dan Mitigasi Risiko, Adaptasi Perubahan Iklim Dalam Teknik Sungai, Arah Masa Depan Dalam Teknik Sungai, Manajemen Sedimen Dan Morfodinamik Sungai.

Proses penulisan buku ini berhasil diselesaikan atas kerjasama tim penulis. Demi kualitas yang lebih baik dan kepuasan para pembaca, saran dan masukan yang membangun dari pembaca sangat kami harapkan.

Penulis ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung dalam penyelesaian buku ini. Terutama pihak yang telah membantu terbitnya buku ini dan telah mempercayakan mendorong, dan menginisiasi terbitnya buku ini. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi masyarakat Indonesia.

Padang, Januari 2025

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	viii
BAB 1 PENGANTAR – BIDANG TEKNIK SUNGAI	
YANG BERKELANJUTAN.....	1
1.1 Pendahuluan.....	1
1.2 Pentingnya Teknik Sungai	3
1.3 Pengembangan Teknologi dan Inovasi dalam Teknik Sungai.....	5
1.4 Isu Lingkungan dalam Teknik Sungai	6
1.5 Dampak Perubahan Iklim dalam Teknik Sungai	8
1.6 Dampak Perubahan Iklim dalam Teknik Sungai	10
1.6.1 Peran Regulasi dan Kebijakan Pemerintah dalam Teknik Sungai.....	10
1.6.2 Regulasi Pengelolaan Sumber Daya Air	11
1.6.3 Standar Keamanan dan Kualitas dalam Proyek Teknik Sungai.....	11
1.6.5 Pengaturan Pemanfaatan Lahan di Sepanjang DAS.....	12
1.6.6 Kolaborasi Antar Pemerintah dan Lembaga Internasional.....	13
1.7 Peran Regulasi dan Kebijakan Pemerintah dalam Teknik Sungai.....	13
1.7.1 Regulasi Pengelolaan Sumber Daya Air	14
1.7.2 Standar Keamanan untuk Infrastruktur Sungai.....	14
1.7.3 Perlindungan Lingkungan dalam Teknik Sungai.....	15
1.7.4 Zonasi dan Pengaturan Tata Ruang di Wilayah DAS	15
1.7.5 Kebijakan Kolaborasi Antar Pemerintah.....	15
1.8 Contoh Penerapan Teknik Sungai.....	16
1.8.1 Pembangunan Bendungan.....	16
1.8.2 Penguatan Tanggul.....	17
1.8.3 Kanal Banjir	17
1.8.4 Restorasi Aliran Sungai.....	17

1.8.5 Pengelolaan Daerah Tangkapan Air (DTA)	17
1.9 Tantangan Masa Depan dalam Teknik Sungai	18
1.9.1 Keterbatasan Anggaran.....	18
1.9.2 Kesadaran Masyarakat akan Pengelolaan Sungai yang Berkelanjutan	19
1.9.3 Tantangan Perubahan Iklim.....	19
DAFTAR PUSTAKA	20
BAB 2 PRAKTIK PENGELOLAAN SUNGAI YANG BERKELANJUTAN	23
2.1 Pengelolaan Sumber Daya Air Secara Menyeluruh	23
2.1.2 Konservasi Air sebagai Bagian dari Pengelolaan Sungai.....	24
2.1.2 Pengendalian Polusi dalam Pengelolaan Sungai	24
2.1.3 Pemanfaatan Sumber Daya Air yang Berkelanjutan	25
2.1.3 Pendekatan Adaptif dalam Pengelolaan Sungai.....	25
2.2 Penerapan Solusi Berbasis Alam (<i>Nature-Based Solutions</i>) dalam Teknik Sungai	26
2.2.1 Restorasi Lahan Basah sebagai Solusi Berbasis Alam	26
2.2.2 Hutan Riparian sebagai Penahan Banjir dan Penyaring Alami.....	27
2.2.3 Naturalisasi Aliran Sungai.....	27
2.3 Perancangan Infrastruktur yang Adaptif dalam Teknik Sungai	28
2.3.1 Adaptasi Terhadap Perubahan Iklim	28
2.3.2 Desain Bendungan Adaptif.....	29
2.3.3 Tanggul yang Fleksibel dan Ramah Lingkungan.....	29
2.3.4 Kanal Banjir dan Sistem Drainase Adaptif	30
2.4 Pemanfaatan Teknologi untuk Pengelolaan Data dalam Teknik Sungai	30
2.4.1 Sensor IoT untuk Pengumpulan Data <i>Real-Time</i>	31
2.4.2 Penginderaan Jauh untuk Pemantauan Ekosistem.....	32

2.4.3	Pengelolaan Big Data dalam Teknik Sungai.....	32
2.4.4	Pengambilan Keputusan Berdasarkan Data.....	33
2.5	Partisipasi dan Edukasi Masyarakat dalam Pengelolaan Sungai Berkelanjutan	33
2.5.1	Peningkatan Kesadaran Masyarakat melalui Edukasi.....	34
2.5.2	Partisipasi Masyarakat dalam Pemeliharaan Sungai	34
2.5.3	Pengaruh Partisipasi Masyarakat Terhadap Kebijakan Pengelolaan Sungai.....	35
2.5.4	Tantangan dalam Menggalakkan Partisipasi Masyarakat	36
2.6	Kolaborasi Lintas Sektor dalam Pengelolaan Sungai Berkelanjutan.....	36
2.6.1	Pentingnya Kolaborasi dalam Pengelolaan Sungai	37
2.6.2	Peran Pemerintah dalam Kolaborasi Lintas Sektor	37
2.6.3	Sektor Swasta dan Kontribusinya dalam Pengelolaan Sungai	38
2.6.4	Masyarakat sebagai Pemangku Kepentingan Utama.....	38
2.6.5	Tantangan dalam Kolaborasi Lintas Sektor	39
2.7	Adaptasi Terhadap Perubahan Iklim dalam Teknik Sungai.....	39
2.7.1	Dampak Perubahan Iklim terhadap Sistem Sungai	40
2.7.2	Solusi Adaptif dalam Teknik Sungai.....	40
2.7.3	Pengelolaan Berbasis Alam sebagai Solusi Adaptif	41
2.7.4	Infrastruktur Fleksibel dan Adaptif.....	41
2.7.5	Konservasi Air dan Pengelolaan Sumber Daya.....	42
	DAFTAR PUSTAKA.....	43
	BAB 3 KETAHANAN DALAM TEKNIK SUNGAI.....	47
3.1	Pendahuluan.....	47
3.1.1	Pencemaran dan Kualitas Air Sungai.....	49
3.1.2	Dampak Pencemaran dan Kualitas Air Sungai.....	50

3.1.3 Upaya Penanggulangan Pencemaran dan Kualitas Air Sungai	51
3.2 Ketahanan Dalam Teknik Sungai	55
3.2.1 Ketahanan Sumber Daya Air	55
3.2.2 Ketahanan Masyarakat Tepian Sungai	57
3.2.3 Ketahanan Infrastruktur Sepanjang Sungai	60
3.2.4 Ketahanan untuk Adaptasi dan Respon Terhadap Bencana	62
3.3 Masyarakat Tepi Sungai Beradaptasi dengan Resiko Bencana.....	64
DAFTAR PUSTAKA	66
BAB 4 INTEGRASI JASA EKOSISTEM DALAM TEKNIK SUNGAI.....	69
4.1 Definisi Jasa Ekosistem dalam Konteks Teknik Sungai	69
4.2 Jenis-Jenis Jasa Ekosistem yang Relevan dalam Konteks Sungai	82
DAFTAR PUSTAKA	142
BAB 5 MANAJEMEN BANJIR DAN MITIGASI RISIKO	153
5.1 Pendahuluan	153
5.2 Definisi dan Penyebab Banjir	153
5.2.1 Definisi Banjir.....	153
5.2.2 Penyebab Banjir.....	154
5.3 Manajemen Banjir	161
5.3.1 Upaya Struktural	161
5.3.2 Upaya Non-Struktural	165
5.4 Mitigasi Risiko Banjir	168
5.4.1 Pendekatan Mitigasi.....	168
5.4.2 Strategi Mitigasi	171
DAFTAR PUSTAKA	174
BAB 6 ADAPTASI PERUBAHAN IKLIM DALAM TEKNIK SUNGAI.....	179
6.1 Kualitas Air.....	180
6.2 Erosi dan Sedimentasi	181
6.3 Kondisi Vegetasi.....	183
6.4 Penggunaan Lahan	184
6.5 Kondisi Ekosistem	185

6.6 Kegiatan Manusia	186
6.7 Kesimpulan.....	196
DAFTAR PUSTAKA.....	197
BAB 7 ARAH MASA DEPAN DALAM TEKNIK SUNGAI.....	203
7.1 Pendahuluan.....	203
7.2 Evolusi Teknik Sungai	204
7.2.1 Masa Lalu	204
7.2.2 Masa Kini.....	205
7.2.3 Masa Depan	205
7.3 Pendekatan Holistik	206
7.3.1 Pendekatan Sosio-Ekologis.....	206
7.3.2 Pendekatan Biorekayasa untuk Stabilisasi Tebing.....	207
7.3.3 Restorasi Sungai.....	209
7.4 Kolaborasi Lintas Disiplin	211
7.4.1 Manajemen Banjir Terpadu	211
7.4.2 Manajemen Sampah Sungai Inovatif.....	213
7.4.3 Manajemen Sedimen Berkelanjutan	215
7.5 Inovasi Berkelanjutan	218
7.5.1 Desain Bendungan Ramah Lingkungan	218
7.5.2 Infrastruktur Hijau untuk Manajemen Air	223
7.5.3 Infrastruktur Sungai Multifungsi.....	227
DAFTAR PUSTAKA.....	230
BAB 8 MANAJEMEN SEDIMEN DAN MORFODINAMIK SUNGAI	243
8.1 Pendahuluan.....	243
8.2 Fenomena dasar morfodinamik sungai	244
8.2.1 Konsep Dasar Morfodinamik Sungai	245
8.2.2 Dinamika Aliran Sungai	246
8.2.3 Erosi dan Sedimentasi	247
8.2.4 Perubahan Morfologi Sungai	247
8.2.5 Studi Kasus Morfodinamik Sungai	248
8.2.6 Teknologi dan Inovasi dalam Studi Morfodinamik	249
8.3 Faktor-faktor yang mempengaruhi sedimentasi	249
8.4 Dampak sedimentasi terhadap lingkungan dan masyarakat.....	251
8.5 Metode pengendalian sedimentasi.....	253

8.6 Studi kasus manajemen sedimen di berbagai belahan dunia	254
DAFTAR PUSTAKA	257
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1. Sampah plastik yang menumpuk di sungai	52
Gambar 3.2. Pemantauan Kualitas Air Sungai	53
Gambar 3.3. Kondisi Perumahan Tepian Sungai.....	58
Gambar 5.1. Fenomena Banjir Jakarta.....	154
Gambar 5.2. Dampak Perubahan Iklim.....	155
Gambar 5.3. Kondisi Deforestasi.....	156
Gambar 5.4. Dampak Drainase Buruk.....	156
Gambar 5.5. Pembangunan di Sempadan Sungai	157
Gambar 5.6. Pembangunan di Sempadan Sungai	158
Gambar 5.7. Fenomena Alam di Indonesia.....	158
Gambar 5.8. Contoh Peta Perubahan Penggunaan Lahan.....	159
Gambar 5.9. Saluran yang tersumbat sampah.....	160
Gambar 5.10. Fenomena La Nina dan El Nino.....	161
Gambar 5.11. Infrastruktur dalam manajemen banjir	163
Gambar 5.12. Model Pembangunan Ramah Lingkungan.....	163
Gambar 5.13. Sumur Resapan (<i>Infiltration Well</i>).....	165
Gambar 5.14. Sistem Peringatan Dini Bencana Digital DPIS.....	167
Gambar 5.15. Tanggul Laut terbesar di Indonesia.....	170
Gambar 7.1. Biorekayasa untuk Stabilisasi Tebing.....	208
Gambar 7.2. Contoh pelaksanaan restorasi tanggul.....	210
Gambar 7.3. Sistem pengangkutan sampah otomatis	214
Gambar 7.4. Pengelolaan sedimen di reservoir menggunakan sistem sedimen bypass.....	220
Gambar 7.5. Sistem lahan basah buatan	228

BAB 1

PENGANTAR – BIDANG TEKNIK SUNGAI YANG BERKELANJUTAN

Oleh Amrullah Mansida

1.1 Pendahuluan

Teknik sungai merupakan cabang ilmu dari teknik sipil yang secara khusus mempelajari dan menerapkan prinsip-prinsip rekayasa untuk pengelolaan sungai. Tujuan utama dari teknik sungai adalah mengontrol dan meminimalkan dampak negatif dari sungai terhadap manusia dan lingkungan, seperti banjir, erosi, dan degradasi kualitas air. Dalam beberapa dekade terakhir, teknik sungai telah mengalami perkembangan pesat sebagai respons terhadap meningkatnya frekuensi bencana alam yang disebabkan oleh perubahan iklim dan degradasi lingkungan akibat aktivitas manusia, termasuk deforestasi dan urbanisasi yang tidak terkendali.

Pencegahan Banjir Salah satu komponen utama dari teknik sungai adalah pencegahan banjir. Sebagai salah satu ancaman lingkungan terbesar, banjir dapat menyebabkan kerusakan infrastruktur, hilangnya nyawa, dan kerugian ekonomi yang sangat besar. Untuk mengatasi hal ini, teknik sungai mengembangkan berbagai pendekatan untuk mengelola aliran air sungai dan mengurangi risiko banjir. Beberapa pendekatan struktural yang digunakan antara lain adalah pembangunan bendungan, tanggul, dan saluran banjir (*flood channels*). Selain itu, solusi berbasis alam seperti restorasi lahan basah dan pembuatan zona penyangga riparian juga terbukti efektif dalam mengurangi risiko banjir secara alami (Popescu *et al.*, 2024)(Rahmadhani, no date).

Pengendalian Erosi Selain pencegahan banjir, pengendalian erosi juga merupakan salah satu tujuan utama dalam teknik sungai. Erosi yang tidak terkendali dapat menyebabkan sedimentasi yang berlebihan di sungai, merusak habitat ekosistem akuatik, dan menurunkan kualitas air. Teknik-teknik untuk pengendalian erosi

mencakup penggunaan revetments (struktur penahan erosi di tepi sungai), vegetasi alami di sepanjang bantaran sungai, dan pembangunan tanggul batu atau beton untuk menahan aliran air dan memperlambat erosi (Maryono, 2018).

Manajemen Kualitas Air Sungai sering kali menjadi tempat pembuangan limbah dari berbagai aktivitas manusia, baik itu limbah domestik, industri, maupun pertanian, yang berkontribusi terhadap penurunan kualitas air. Dalam hal ini, teknik sungai berperan penting dalam mengembangkan teknologi dan strategi untuk manajemen kualitas air yang lebih baik. Salah satu pendekatan yang digunakan adalah dengan memperbaiki morfologi sungai dan memulihkan ekosistem alami sungai sehingga sungai mampu memproses polutan secara lebih efektif. Pendekatan seperti naturalisasi sungai (*river naturalization*) semakin populer karena terbukti meningkatkan kualitas air dan memperbaiki kapasitas sungai dalam menghadapi dampak perubahan iklim (Maryono, 2018).

Pemulihan Ekosistem Sungai Teknik sungai juga sering kali terlibat dalam proyek pemulihan ekosistem sungai yang telah mengalami kerusakan akibat intervensi manusia, seperti pembangunan bendungan atau kanal yang mengganggu keseimbangan ekosistem alami. Salah satu metode yang digunakan dalam pemulihan ekosistem sungai adalah daylighting, yaitu proses membuka kembali aliran sungai yang sebelumnya dialihkan ke saluran bawah tanah dan mengembalikannya ke jalur alaminya. Pemulihan ekosistem sungai ini bertujuan untuk memperbaiki fungsi hidrologis dan ekologis dari sungai, serta mendukung keanekaragaman hayati.

Pendekatan Berbasis Alam dan Perubahan Iklim Seiring dengan meningkatnya kesadaran akan pentingnya keberlanjutan lingkungan, teknik sungai semakin mengarah pada penggunaan pendekatan berbasis alam (*nature-based solutions*). Pendekatan ini lebih mengutamakan solusi alami yang memanfaatkan ekosistem sungai, seperti hutan riparian dan lahan basah, untuk mengurangi risiko banjir, mengendalikan erosi, dan memperbaiki kualitas air secara alami. Pendekatan berbasis alam ini tidak hanya lebih ramah lingkungan, tetapi juga lebih ekonomis dan berkelanjutan dalam

jangka panjang dibandingkan dengan pendekatan berbasis infrastruktur keras, seperti pembangunan bendungan atau kanal yang sering kali memiliki dampak negatif pada lingkungan (Asima *et al.*, 2022) (Quinton and Fiener, 2024).

1.2 Pentingnya Teknik Sungai

Pertumbuhan populasi dan urbanisasi yang pesat menempatkan banyak wilayah di dunia pada risiko tinggi terhadap berbagai masalah lingkungan, salah satunya adalah banjir. Teknik sungai menjadi solusi penting dalam mengelola aliran sungai untuk melindungi pemukiman, mendukung sistem irigasi pertanian, serta menjaga kualitas air yang diperlukan oleh manusia dan ekosistem. Seiring meningkatnya kesadaran akan pentingnya pengelolaan sungai secara berkelanjutan, teknik sungai terus berkembang dalam menyediakan infrastruktur yang dapat mengurangi dampak negatif lingkungan dan memaksimalkan manfaat dari sumber daya sungai.

Pengendalian Banjir Salah satu alasan utama mengapa teknik sungai sangat penting adalah untuk pengendalian banjir, terutama di wilayah yang padat penduduk dan rentan terhadap bencana alam. Banjir dapat menyebabkan kerusakan infrastruktur, kerugian ekonomi, dan hilangnya nyawa. Dengan menerapkan teknik sungai, seperti pembangunan tanggul, bendungan, dan sistem kanal, aliran air yang berlebihan dapat dikendalikan sehingga risiko banjir dapat diminimalkan. Sistem pengendalian banjir ini juga sering dikombinasikan dengan metode alami, seperti restorasi lahan basah, yang tidak hanya mengurangi risiko banjir tetapi juga berkontribusi pada peningkatan keanekaragaman hayati (Thoms and Fuller, 2023).

Mendukung Irigasi Pertanian Pertanian merupakan sektor yang sangat bergantung pada sumber daya air, dan sungai adalah salah satu sumber utama air irigasi. Dengan populasi yang terus bertambah, kebutuhan akan produksi pangan semakin meningkat, dan irigasi yang efektif sangat penting untuk mencapai tujuan ini. Teknik sungai menyediakan solusi dalam memastikan bahwa air sungai dapat dimanfaatkan secara efisien untuk irigasi tanpa menyebabkan kerusakan lingkungan atau berkurangnya kualitas air.

Menjaga Kualitas Air Kualitas air yang baik sangat penting untuk kehidupan manusia dan keberlanjutan ekosistem. Namun, sungai sering kali menjadi tempat pembuangan limbah domestik, industri, dan pertanian, yang mengakibatkan polusi air. Teknik sungai tidak hanya berfokus pada pengendalian aliran air, tetapi juga berperan dalam menjaga dan meningkatkan kualitas air sungai. Proyek-proyek pemulihan sungai sering kali mencakup upaya untuk mengurangi polusi dengan memperbaiki morfologi sungai dan memulihkan vegetasi alami di sekitar sungai. Pendekatan ini terbukti efektif dalam meningkatkan kualitas air sekaligus menjaga keseimbangan ekosistem di sekitar Sungai (Maryono, 2018). Pemulihan Ekosistem Sungai Teknik sungai tidak hanya bertujuan untuk mengontrol aliran air, tetapi juga untuk memulihkan ekosistem sungai yang rusak akibat aktivitas manusia, seperti deforestasi, urbanisasi, dan pembangunan infrastruktur yang tidak berkelanjutan. Pemulihan ekosistem sungai dilakukan dengan cara mengembalikan fungsi alami sungai, baik dalam hal hidrologi maupun ekologi. Contoh nyata dari pemulihan ekosistem sungai adalah "*daylighting*," yaitu membuka kembali bagian sungai yang dialihkan ke saluran bawah tanah agar kembali ke jalur alaminya. Upaya pemulihan ini bertujuan untuk memperbaiki habitat alami serta meningkatkan kemampuan sungai dalam menahan banjir dan menyaring polutan (Fairuzzen *et al.*, 2024) (Noe *et al.*, 2024).

Solusi Berbasis Alam dan Perubahan Iklim Dengan adanya perubahan iklim yang mempengaruhi pola curah hujan dan meningkatkan risiko banjir, solusi berbasis alam (*nature-based solutions*) dalam teknik sungai menjadi semakin populer. Pendekatan ini melibatkan pemanfaatan ekosistem alami, seperti lahan basah dan hutan riparian, untuk mengelola air secara lebih berkelanjutan. Solusi berbasis alam ini lebih ramah lingkungan dan ekonomis dibandingkan dengan solusi berbasis infrastruktur keras, seperti bendungan dan kanal, yang sering kali memiliki dampak jangka panjang yang merugikan terhadap lingkungan (Drill and Post, 2022).

1.3 Pengembangan Teknologi dan Inovasi dalam Teknik Sungai

Perkembangan teknologi modern telah memberikan dampak signifikan pada berbagai sektor, termasuk teknik sungai. Inovasi teknologi yang terus berkembang membantu meningkatkan efektivitas desain, implementasi, dan pemantauan proyek pengelolaan sungai. Beberapa teknologi kunci yang telah membawa perubahan besar dalam bidang ini adalah model hidraulik berbasis komputer, pemetaan digital, dan penggunaan drone untuk pemantauan sungai. Teknologi-teknologi ini memberikan pendekatan yang lebih tepat dan efisien dalam mengelola aliran sungai, mengurangi risiko bencana alam, serta memastikan keberlanjutan ekosistem sungai.

Model Hidraulik Berbasis Komputer Teknologi model hidraulik berbasis komputer telah menjadi salah satu alat utama dalam merancang proyek teknik sungai. Model ini memungkinkan insinyur untuk mensimulasikan berbagai skenario aliran air sungai dengan berbagai kondisi iklim dan hidrologi. Simulasi ini memberikan wawasan yang mendalam tentang bagaimana sungai akan berperilaku di bawah skenario yang berbeda, termasuk banjir atau kekeringan (Drill and Post, 2022). Dengan model hidraulik, para ahli dapat memprediksi area yang rentan terhadap banjir dan merancang sistem perlindungan yang tepat. Model hidraulik modern juga dapat dikombinasikan dengan data real-time dari sensor aliran sungai untuk meningkatkan akurasi prediksi dan pengambilan keputusan. Selain itu, model ini membantu dalam mengurangi ketergantungan pada eksperimen fisik yang mahal dan memakan waktu.

Pemetaan Digital dan GIS Inovasi dalam pemetaan digital dan Sistem Informasi Geografis (GIS) telah memainkan peran penting dalam mengelola proyek teknik sungai secara lebih efisien. Dengan pemetaan digital, informasi geografis tentang sungai dan daerah alirannya dapat diakses secara cepat dan akurat. Teknologi GIS memungkinkan visualisasi interaktif dan analisis data yang lebih mendalam tentang topografi, penggunaan lahan, dan perubahan morfologi sungai seiring waktu. Hal ini memungkinkan perencanaan yang lebih efektif dalam mengelola risiko banjir, erosi, dan

sedimentasi. Teknologi ini juga berguna dalam mendukung pemulihan ekosistem dengan memantau perubahan ekosistem sungai dan mengidentifikasi area yang memerlukan intervensi.

Penggunaan Drone untuk Pemantauan Sungai Teknologi drone telah membawa revolusi dalam pemantauan aliran sungai. Sebelumnya, pemantauan sungai sering kali membutuhkan waktu yang lama dan sumber daya manusia yang besar, terutama di daerah yang sulit dijangkau. Namun, dengan drone, pengumpulan data dapat dilakukan secara lebih cepat dan dengan biaya yang lebih rendah. Drone memungkinkan pengambilan gambar dan video dari ketinggian yang dapat digunakan untuk memantau aliran sungai, mendeteksi area banjir, serta mengidentifikasi perubahan topografi dan vegetasi di sekitar sungai. Selain itu, penggunaan drone memungkinkan pemantauan yang lebih teratur dan tepat waktu, yang sangat penting dalam situasi darurat seperti banjir (Opperman and Galloway, 2022)(Kuma, Feyessa and Demissie, 2023).

Inovasi Berbasis Data dan *Internet of Things* (IoT) Selain model hidraulik dan drone, inovasi terbaru dalam Internet of Things (IoT) telah memberikan peluang baru untuk meningkatkan pengelolaan sungai.(Rane, Choudhary and Rane, 2023) Sensor IoT dapat dipasang di berbagai titik di sepanjang sungai untuk memantau data real-time seperti ketinggian air, kecepatan aliran, kualitas air, dan perubahan suhu. Data ini kemudian dapat dianalisis menggunakan algoritma kecerdasan buatan untuk memberikan prediksi yang lebih akurat terkait risiko banjir atau kekeringan, serta membantu dalam pemeliharaan infrastruktur sungai(Wimalaweera, 2024). Penggunaan IoT memungkinkan pengelolaan sungai yang lebih cerdas dan berbasis data, yang dapat secara signifikan mengurangi dampak bencana alam serta mendukung keberlanjutan sumber daya air (Opperman and Galloway, 2022).

1.4 Isu Lingkungan dalam Teknik Sungai

Teknik sungai telah berkembang dari pendekatan tradisional yang fokus pada pengendalian banjir dan pengelolaan air, menjadi disiplin yang lebih holistik dengan perhatian lebih terhadap dampak lingkungan. Desain modern dalam teknik sungai tidak hanya

berupaya untuk mencegah bencana alam seperti banjir, tetapi juga memastikan bahwa pelestarian lingkungan dan keberlanjutan ekosistem menjadi prioritas. Konsep ini mencakup penggunaan pendekatan bioengineering dan solusi berbasis alam untuk menciptakan proyek yang ramah lingkungan, sekaligus memperbaiki dan melindungi ekosistem Sungai (Kuma, Feyessa and Demissie, 2023). Pendekatan ini diperlukan untuk menjaga keseimbangan antara kebutuhan manusia dan keberlanjutan lingkungan di tengah perubahan iklim dan urbanisasi yang cepat.

Pengelolaan Sungai Berbasis Lingkungan Pengelolaan sungai tradisional seringkali hanya berfokus pada kontrol aliran air dan infrastruktur keras seperti bendungan dan tanggul. Namun, pendekatan ini sering kali mengabaikan dampak jangka panjang terhadap ekosistem sungai dan keanekaragaman hayati. Proyek pengelolaan sungai modern kini memperhitungkan dampak lingkungan secara lebih komprehensif, dengan tujuan menjaga keberlanjutan ekosistem sungai dan mengurangi kerusakan habitat alami. Pendekatan seperti restorasi sungai dan rehabilitasi lahan basah telah diterapkan untuk memperbaiki ekosistem yang rusak dan mendukung keanekaragaman hayati. Sebagai contoh, penelitian yang dilakukan oleh (Rane, Choudhary and Rane, 2023) menunjukkan bahwa penggunaan solusi berbasis alam, seperti restorasi hutan riparian, tidak hanya efektif dalam mengurangi risiko banjir, tetapi juga meningkatkan kualitas air dan habitat bagi spesies akuatik.

Pendekatan Bioengineering dalam Teknik Sungai Pendekatan bioengineering dalam teknik sungai mencakup penggunaan elemen alami seperti vegetasi untuk memperkuat struktur sungai dan mengurangi dampak lingkungan dari infrastruktur keras. Pendekatan ini mencakup penggunaan tanaman yang tahan terhadap erosi untuk menstabilkan bantaran sungai dan mengurangi aliran sedimentasi ke sungai. Bioengineering juga dapat meningkatkan infiltrasi air ke dalam tanah, yang membantu mengurangi risiko banjir dan meningkatkan kualitas air. (Hill, 2024) menekankan bahwa pendekatan bioengineering memberikan solusi yang lebih berkelanjutan dibandingkan dengan pendekatan infrastruktur keras, karena dapat beradaptasi secara alami dengan

kondisi lingkungan yang berubah, serta lebih efisien dalam mempertahankan keanekaragaman hayati di sepanjang sungai.

Mitigasi Dampak Perubahan Iklim Perubahan iklim telah meningkatkan frekuensi dan intensitas banjir di banyak wilayah, sehingga teknik sungai modern harus mengadaptasi desainnya untuk mengatasi tantangan ini. Solusi berbasis alam seperti restorasi lahan basah dan hutan riparian menawarkan perlindungan alami terhadap banjir, karena dapat menyerap dan menyimpan air hujan dalam jumlah besar. Restorasi lahan basah, misalnya, dapat berfungsi sebagai "penyerap banjir" alami yang mengurangi tekanan pada sungai selama musim hujan. (Mannucci, 2024) Lahan basah yang dipulihkan mampu menyerap 30% lebih banyak air hujan dibandingkan lahan yang telah terdegradasi, memberikan solusi yang berkelanjutan dalam menghadapi risiko banjir akibat perubahan iklim.

Manfaat Ekologis dan Sosial dari Pendekatan Berbasis Alam Selain mengurangi risiko banjir dan menjaga kualitas air, pendekatan berbasis alam dalam teknik sungai juga memberikan manfaat tambahan bagi masyarakat. Restorasi sungai yang ramah lingkungan dapat menciptakan ruang terbuka hijau bagi masyarakat perkotaan, yang dapat digunakan untuk rekreasi dan edukasi lingkungan. Area hijau di sepanjang sungai juga berfungsi sebagai penyangga ekologis yang dapat menyerap polusi udara dan mengurangi efek panas perkotaan. Hal ini telah terbukti meningkatkan kualitas hidup di kota-kota besar, terutama di negara-negara yang sangat urban seperti Jepang dan Belanda, di mana proyek restorasi sungai telah memberikan manfaat ganda, baik dari segi ekologis maupun social(Asdak, 2023),(Drill and Post, 2022).

1.5 Dampak Perubahan Iklim dalam Teknik Sungai

Perubahan iklim telah mempengaruhi berbagai aspek lingkungan, termasuk frekuensi dan intensitas bencana alam seperti banjir dan erosi. Fenomena ini terutama dirasakan di daerah-daerah yang dekat dengan sungai dan pesisir, di mana peningkatan curah hujan ekstrem serta kenaikan permukaan air laut memperburuk risiko banjir dan mempercepat erosi. Teknik sungai modern

berusaha menghadapi tantangan ini dengan mengembangkan infrastruktur yang mampu beradaptasi terhadap perubahan iklim. Hal ini melibatkan perancangan yang fleksibel, penggunaan solusi berbasis alam, serta integrasi teknologi untuk memantau kondisi sungai secara *real-time*.

Frekuensi dan Intensitas Banjir Salah satu dampak paling signifikan dari perubahan iklim terhadap sistem sungai adalah peningkatan frekuensi dan intensitas banjir. Perubahan pola curah hujan yang semakin tidak menentu, serta intensitas hujan yang lebih ekstrem, menyebabkan volume air yang besar harus ditampung oleh sungai dalam waktu singkat, meningkatkan risiko banjir bandang (Wimalaweera, 2024). Frekuensi banjir besar telah meningkat secara signifikan dalam 20 tahun terakhir di banyak wilayah, terutama di daerah perkotaan yang mengalami pertumbuhan pesat. Teknik sungai kini berfokus pada peningkatan kapasitas infrastruktur untuk menahan air secara lebih efisien, dengan menggunakan bendungan, tanggul, dan sistem drainase yang dirancang khusus untuk menampung volume air yang lebih besar dalam waktu singkat.

Percepatan Erosi Sungai dan Pantai Selain banjir, erosi sungai dan pantai juga mengalami percepatan akibat perubahan iklim. Kenaikan permukaan air laut dan peningkatan kecepatan aliran sungai selama banjir mempercepat pengikisan tanah di sepanjang bantaran sungai dan pantai, yang dapat mengancam infrastruktur dan lahan pertanian. Teknik sungai modern merespons tantangan ini dengan pendekatan bioengineering, yang menggunakan vegetasi alami untuk memperkuat bantaran sungai dan mengurangi kecepatan erosi. Vegetasi alami tidak hanya memperlambat aliran air, tetapi juga membantu menstabilkan tanah dengan sistem akar yang kuat.

Bioengineering di sepanjang sungai yang rentan terhadap erosi mampu mengurangi kehilangan tanah hingga 50% dibandingkan dengan metode tradisional seperti penggunaan batu atau beton. Pendekatan ini juga lebih berkelanjutan dalam jangka panjang, karena vegetasi alami memiliki kemampuan untuk beregenerasi dan beradaptasi terhadap perubahan lingkungan (Asima *et al.*, 2022).

Perancangan Infrastruktur yang Fleksibel Teknik sungai modern semakin bergeser ke arah perancangan infrastruktur yang lebih fleksibel dan adaptif terhadap perubahan iklim. Infrastruktur yang kaku seperti bendungan besar atau kanal sering kali tidak mampu menghadapi perubahan lingkungan yang dinamis, dan dapat menimbulkan dampak negatif terhadap ekosistem sekitarnya.

Solusi Berbasis Alam dan Keberlanjutan Solusi berbasis alam (nature-based solutions) semakin diakui sebagai cara yang lebih berkelanjutan untuk menghadapi dampak perubahan iklim terhadap sungai. Selain restorasi lahan basah dan hutan riparian, proyek-proyek restorasi sungai yang melibatkan *daylighting* (membuka kembali sungai yang dialihkan ke bawah tanah) juga semakin populer. Solusi ini bertujuan untuk mengembalikan fungsi alami sungai dan meningkatkan kapasitas sungai dalam menahan air hujan serta mengurangi risiko banjir .

Solusi berbasis alam tidak hanya lebih berkelanjutan, tetapi juga lebih ekonomis dibandingkan dengan pembangunan infrastruktur keras. Restorasi sungai berbasis alam membutuhkan biaya investasi awal yang lebih rendah dan biaya pemeliharaan yang lebih sedikit dibandingkan dengan bendungan besar atau kanal (Rani and Kumar, 2024). Pendekatan ini juga memberikan manfaat tambahan seperti peningkatan keanekaragaman hayati dan ruang terbuka hijau untuk masyarakat.

1.6 Dampak Perubahan Iklim dalam Teknik Sungai

1.6.1 Peran Regulasi dan Kebijakan Pemerintah dalam Teknik Sungai

Regulasi dan kebijakan pemerintah memainkan peran yang sangat penting dalam pengelolaan sumber daya air dan perlindungan wilayah aliran sungai (DAS). Di berbagai negara, pemerintah telah mengembangkan kerangka hukum yang mengatur pengelolaan sungai, dengan tujuan melindungi lingkungan, mengurangi risiko bencana alam, serta memastikan keberlanjutan sumber daya air bagi generasi mendatang. Dalam teknik sungai, peran pemerintah dalam menetapkan standar, regulasi, dan kebijakan tidak hanya membantu menciptakan proyek yang aman dan efisien, tetapi juga mendorong inovasi dalam pengelolaan

sungai yang berkelanjutan. Tanpa regulasi yang tepat, infrastruktur teknik sungai mungkin akan berdampak buruk pada lingkungan dan ekosistem.

1.6.2 Regulasi Pengelolaan Sumber Daya Air

Pengelolaan sumber daya air adalah elemen kunci dalam teknik sungai, dan pemerintah memiliki peran sentral dalam mengatur penggunaan, distribusi, dan konservasi air. Di banyak negara, undang-undang air telah diterapkan untuk mengatur penggunaan air untuk irigasi, industri, dan kebutuhan domestik. Regulasi ini penting untuk mencegah eksploitasi berlebihan yang dapat menyebabkan penurunan kualitas air dan kerusakan ekosistem sungai.

Regulasi yang efektif dalam pengelolaan air dapat mengurangi tekanan pada sistem sungai dan memastikan bahwa air digunakan secara berkelanjutan (Rani and Kumar, 2024). Kebijakan air yang baik juga memungkinkan pengelolaan air berbasis DAS, di mana setiap pengguna air di sepanjang sungai diwajibkan untuk mematuhi standar yang ditetapkan untuk mencegah polusi dan menjaga keseimbangan ekosistem.

1.6.3 Standar Keamanan dan Kualitas dalam Proyek Teknik Sungai

Pemerintah memiliki peran penting dalam menetapkan standar keamanan untuk proyek teknik sungai, termasuk standar kualitas konstruksi bendungan, tanggul, dan infrastruktur lainnya yang dirancang untuk mengelola aliran sungai. Standar ini bertujuan untuk memastikan bahwa infrastruktur yang dibangun mampu menahan tekanan dari aliran air yang meningkat selama banjir, serta mampu bertahan dalam jangka waktu yang lama tanpa mengalami kerusakan struktural.

Sebagai contoh, di Uni Eropa, *European Union Water Framework Directive (EU WFD)* menetapkan standar yang sangat ketat untuk perlindungan dan pengelolaan sungai. Kebijakan ini bertujuan untuk mencapai "status ekologis yang baik" bagi semua perairan di Uni Eropa, dan mendorong negara-negara anggota untuk mengadopsi langkah-langkah yang diperlukan untuk

melindungi kualitas air serta ekosistem sungai. Regulasi seperti EU WFD telah berhasil mengurangi tingkat polusi air dan memperbaiki kesehatan ekosistem di berbagai wilayah Eropa (Postel and Richter, 2012).

1.6.4 Kebijakan Perlindungan Lingkungan

Dalam beberapa dekade terakhir, semakin banyak negara yang mulai menyadari pentingnya perlindungan lingkungan dalam pengelolaan sungai. Kebijakan-kebijakan ini berfokus pada pelestarian habitat alami di sepanjang sungai, termasuk perlindungan lahan basah dan hutan riparian, yang memainkan peran penting dalam mencegah erosi, menyaring polutan, dan menyediakan habitat bagi berbagai spesies akuatik. Kebijakan ini sering kali melibatkan kolaborasi antara pemerintah, organisasi lingkungan, dan masyarakat setempat untuk memulihkan ekosistem yang terdegradasi akibat pembangunan infrastruktur yang tidak berkelanjutan.

Misalnya, program restorasi sungai di Amerika Serikat, seperti yang diatur dalam *Clean Water Act*, telah berhasil memulihkan ribuan kilometer sungai dan lahan basah yang rusak. Program ini memberikan insentif kepada pemerintah lokal dan organisasi nirlaba untuk memulihkan ekosistem alami di sepanjang sungai, sekaligus memperbaiki kualitas air dan mengurangi risiko banjir.

Restorasi sungai yang didorong oleh kebijakan pemerintah tidak hanya memperbaiki kondisi lingkungan, tetapi juga memberikan manfaat ekonomi bagi masyarakat lokal, termasuk peningkatan kualitas air untuk pertanian dan rekreasi (Waskitho, 2024).

1.6.5 Pengaturan Pemanfaatan Lahan di Sepanjang DAS

Selain mengatur penggunaan air, pemerintah juga memiliki tanggung jawab dalam mengelola pemanfaatan lahan di sepanjang daerah aliran sungai (DAS). Kebijakan zonasi dan perencanaan tata ruang yang baik diperlukan untuk mencegah pembangunan yang tidak berkelanjutan di daerah yang rawan banjir atau erosi. Pemerintah sering kali menerapkan kebijakan untuk melarang pembangunan di zona banjir dan mengharuskan pemilik lahan

untuk menerapkan teknik konservasi tanah yang dapat mengurangi aliran air permukaan dan erosi.

Kebijakan zonasi yang ketat di sepanjang DAS dapat secara signifikan mengurangi risiko banjir dan erosi, serta memperbaiki kesehatan ekosistem sungai. Kebijakan ini juga membantu menjaga kualitas air dengan mengurangi aliran polutan dari lahan pertanian atau perkotaan ke Sungai (Fuller, no date) (Bolognesi, Pinto and Farrelly, 2023).

1.6.6 Kolaborasi Antar Pemerintah dan Lembaga Internasional

Teknik sungai sering kali melibatkan kerja sama antara berbagai tingkat pemerintahan, mulai dari pemerintah pusat hingga lokal, serta kolaborasi dengan lembaga internasional. Organisasi seperti Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) dan Uni Eropa telah memainkan peran penting dalam mendorong negara-negara untuk mengadopsi praktik terbaik dalam pengelolaan sumber daya air. Misalnya, *Sustainable Development Goal 6* (SDG 6) dari PBB mendorong negara-negara untuk memastikan akses air bersih dan sanitasi yang berkelanjutan, serta pengelolaan air yang efektif (van Koppen, 2024).

1.7 Peran Regulasi dan Kebijakan Pemerintah dalam Teknik Sungai

Regulasi dan kebijakan pemerintah memainkan peran sentral dalam pengelolaan sumber daya air dan perlindungan wilayah aliran sungai (DAS). Peraturan-peraturan ini penting dalam memastikan pengembangan proyek teknik sungai yang aman, efisien, dan berkelanjutan. Dalam banyak kasus, pemerintah mengembangkan kebijakan yang berfungsi untuk melindungi masyarakat dari risiko bencana, seperti banjir dan erosi, sekaligus menjaga keberlanjutan ekosistem sungai. Dengan mengintegrasikan prinsip-prinsip keberlanjutan dan keselamatan dalam kebijakan, pemerintah memastikan bahwa proyek teknik sungai dapat mencapai tujuannya secara efektif tanpa merusak lingkungan.

1.7.1 Regulasi Pengelolaan Sumber Daya Air

Pemerintah di berbagai negara telah memperkenalkan regulasi yang ketat untuk mengelola sumber daya air. Pengelolaan air yang efektif memerlukan standar yang jelas dalam hal distribusi dan penggunaan air, baik untuk kebutuhan domestik, industri, maupun pertanian. Regulasi ini sangat penting untuk menjaga kelestarian ekosistem sungai dan menghindari eksploitasi berlebihan yang dapat mengancam kualitas air dan ketersediaan sumber daya tersebut bagi generasi mendatang.

Regulasi pengelolaan air yang terintegrasi secara holistik, di mana berbagai aspek seperti kualitas air, polusi, dan penggunaan air diatur dengan baik, dapat meningkatkan daya tahan sungai terhadap tantangan perubahan iklim dan tekanan populasi yang semakin meningkat. Kebijakan ini juga mendorong pengelolaan berbasis DAS, yang mengakui pentingnya menjaga seluruh ekosistem sungai dalam satu kesatuan untuk mencapai keberlanjutan jangka Panjang (Bolognesi, Pinto and Farrelly, 2023).

1.7.2 Standar Keamanan untuk Infrastruktur Sungai

Pemerintah memiliki tanggung jawab besar dalam menetapkan standar keamanan untuk infrastruktur sungai, seperti bendungan, tanggul, dan kanal. Infrastruktur ini dirancang untuk mengelola aliran air dan mencegah risiko banjir, sehingga kualitas konstruksinya sangat penting untuk memastikan keselamatan jangka panjang. Negara-negara yang memiliki standar keamanan yang ketat biasanya lebih siap menghadapi bencana alam, karena infrastrukturnya dirancang untuk menahan beban air yang lebih tinggi selama musim hujan.

Di Uni Eropa, misalnya, *European Union Water Framework Directive (EU WFD)* menetapkan standar yang ketat untuk pengelolaan air dan perlindungan ekosistem perairan. Kebijakan ini mengharuskan negara-negara anggota untuk memastikan bahwa semua proyek pengelolaan sungai memperhitungkan dampak lingkungan, dan bahwa infrastruktur yang dibangun mampu menahan peningkatan aliran air akibat banjir. Regulasi seperti ini penting untuk mendorong pembangunan infrastruktur sungai yang

lebih tahan lama dan berkelanjutan (Bolognesi, Pinto and Farrelly, 2023).

1.7.3 Perlindungan Lingkungan dalam Teknik Sungai

Dalam beberapa dekade terakhir, pemerintah di seluruh dunia telah memperkenalkan kebijakan yang berfokus pada perlindungan lingkungan dalam konteks pengelolaan sungai. Kebijakan ini sering kali mengharuskan bahwa setiap proyek teknik sungai harus memperhitungkan dampak ekologisnya dan menghindari kerusakan terhadap habitat alami di sepanjang sungai. Misalnya, banyak negara mewajibkan proyek restorasi lahan basah atau hutan riparian sebagai bagian dari mitigasi lingkungan dalam proyek-proyek teknik sungai.

Regulasi yang mendorong restorasi sungai dan rehabilitasi lahan basah telah berhasil meningkatkan kualitas air dan memperbaiki habitat bagi spesies akuatik. Kebijakan lingkungan yang baik juga memberikan insentif kepada perusahaan dan organisasi non-pemerintah untuk berpartisipasi dalam pemulihan ekosistem yang terdegradasi akibat pembangunan infrastruktur yang tidak berkelanjutan (Bolognesi, Pinto and Farrelly, 2023).

1.7.4 Zonasi dan Pengaturan Tata Ruang di Wilayah DAS

Selain regulasi tentang penggunaan air, pemerintah juga memainkan peran penting dalam pengaturan zonasi di sepanjang DAS. Zonasi adalah alat yang digunakan untuk mengelola penggunaan lahan dan mencegah pembangunan di area-area yang rawan banjir atau erosi. Banyak negara melarang pembangunan di zona banjir, serta memberlakukan aturan konservasi tanah untuk mencegah aliran air berlebihan dan penurunan kualitas tanah di sepanjang bantaran sungai. (Jekel, 2005) (Bennion and Battarbee, 2007).

1.7.5 Kebijakan Kolaborasi Antar Pemerintah

Dalam pengelolaan sungai, sering kali diperlukan kolaborasi antara berbagai tingkat pemerintahan – lokal, nasional, hingga internasional. Beberapa sungai melintasi batas negara, sehingga kerja sama antarnegara sangat penting untuk memastikan bahwa

sungai dikelola dengan baik di sepanjang alirannya. Di Eropa, Sungai Danube adalah contoh penting di mana beberapa negara bekerja sama di bawah *International Commission for the Protection of the Danube River* (ICPDR) (Butković and Samardžija, 2013) untuk memastikan pengelolaan sungai yang berkelanjutan, termasuk upaya perlindungan air dan mitigasi polusi.

Selain itu, Perserikatan Bangsa-Bangsa melalui *Sustainable Development Goal 6* (SDG 6) juga telah mendorong kolaborasi global dalam hal pengelolaan air bersih dan sanitasi. (Arora and Mishra, 2022) menunjukkan bahwa kerja sama internasional dalam pengelolaan air sangat penting untuk memastikan bahwa sungai dan sumber daya air lainnya dapat dikelola secara adil dan berkelanjutan, terutama di wilayah-wilayah yang rentan terhadap dampak perubahan iklim.

1.8 Contoh Penerapan Teknik Sungai

Teknik sungai memainkan peran penting dalam pengelolaan sumber daya air, pengendalian bencana alam, dan pemulihan ekosistem. Proyek-proyek teknik sungai seperti pembangunan bendungan, penguatan tanggul, pembangunan kanal banjir, restorasi aliran sungai, serta pengelolaan daerah tangkapan air (DTA) merupakan contoh nyata dari penerapan teknik sungai yang berdampak signifikan. Proyek-proyek ini tidak hanya melindungi wilayah dari ancaman banjir dan erosi tetapi juga memperbaiki kondisi lingkungan dengan memulihkan habitat alami. Dalam konteks perubahan iklim dan urbanisasi yang cepat, penerapan teknik sungai yang efektif menjadi kunci untuk meningkatkan ketahanan daerah terhadap bencana dan menjaga keberlanjutan ekosistem.

1.8.1 Pembangunan Bendungan

Bendungan merupakan salah satu struktur teknik sungai yang paling umum digunakan untuk mengelola aliran air dan mengurangi risiko banjir. Selain itu, bendungan juga digunakan untuk penyimpanan air, pembangkit listrik tenaga air, serta irigasi. Bendungan besar, seperti Bendungan Hoover di Amerika Serikat, telah menunjukkan dampak positif dalam mengendalikan aliran

Sungai Colorado, menyediakan air irigasi untuk lahan pertanian yang luas, dan menghasilkan energi terbarukan melalui tenaga air.

1.8.2 Penguatan Tanggul

Tanggul adalah struktur yang dibangun di sepanjang sungai untuk mencegah aliran air yang meluap ke wilayah pemukiman atau lahan pertanian selama musim hujan. Tanggul memainkan peran penting dalam melindungi masyarakat dari bencana banjir, terutama di daerah dataran rendah dan perkotaan yang rentan. Tanggul sering diperkuat dengan menggunakan material seperti beton atau tanah yang dipadatkan untuk memastikan kestabilan strukturnya saat menahan tekanan air tinggi.

1.8.3 Kanal Banjir

Kanal banjir adalah saluran buatan yang dirancang untuk mengalihkan sebagian aliran sungai ketika debit air meningkat, terutama selama musim hujan atau banjir bandang. Tujuan utama kanal banjir adalah untuk mengurangi risiko banjir di daerah perkotaan atau padat penduduk. Kanal banjir sering dipadukan dengan sistem drainase perkotaan yang dirancang untuk mengalirkan air secara cepat dan efisien ke luar dari wilayah yang rentan banjir.

1.8.4 Restorasi Aliran Sungai

Restorasi aliran sungai bertujuan untuk mengembalikan fungsi ekologis sungai yang telah terganggu oleh aktivitas manusia, seperti pembangunan infrastruktur atau konversi lahan. Restorasi ini sering kali melibatkan pengembalian aliran sungai ke jalur aslinya, pemulihan habitat alami di sepanjang bantaran sungai, dan penanaman vegetasi untuk mengurangi erosi. Restorasi sungai telah terbukti meningkatkan kualitas air, memperbaiki habitat bagi spesies akuatik, dan mengurangi risiko banjir.

1.8.5 Pengelolaan Daerah Tangkapan Air (DTA)

Pengelolaan DTA adalah pendekatan holistik yang bertujuan untuk mengelola seluruh ekosistem sungai dari hulu hingga hilir. DTA mencakup daerah yang menangkap dan menyalurkan air hujan

ke dalam sungai dan badan air lainnya. Pengelolaan yang baik mencakup upaya konservasi tanah dan air di wilayah hulu, pengendalian erosi, serta perlindungan habitat di sepanjang aliran sungai. Dengan mengelola DTA secara holistik, risiko banjir dan erosi dapat dikurangi, sementara kualitas air dapat dipertahankan (Maryono, 2018).

1.9 Tantangan Masa Depan dalam Teknik Sungai

Teknik sungai merupakan bidang yang terus berkembang seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan pengelolaan sumber daya air yang lebih baik, terutama dalam menghadapi ancaman perubahan iklim dan urbanisasi yang pesat. Namun, seiring dengan kemajuan teknologi dan proyek infrastruktur besar-besaran, teknik sungai juga menghadapi berbagai tantangan masa depan. Beberapa tantangan utama termasuk keterbatasan anggaran, pengelolaan data yang kompleks, koordinasi lintas sektor, dan kesadaran masyarakat yang masih rendah akan pentingnya pengelolaan sungai secara berkelanjutan. Memahami dan mengatasi tantangan-tantangan ini sangat penting untuk memastikan bahwa proyek teknik sungai di masa depan dapat berjalan secara efektif dan berkelanjutan (Hill, 2024).

1.9.1 Keterbatasan Anggaran

Salah satu tantangan terbesar dalam pengelolaan teknik sungai adalah keterbatasan anggaran yang tersedia untuk proyek-proyek besar seperti pembangunan bendungan, restorasi sungai, atau pengelolaan daerah aliran sungai (DAS). Pembangunan infrastruktur sungai sering kali membutuhkan dana yang sangat besar, baik untuk tahap perencanaan maupun pelaksanaannya. Selain itu, biaya pemeliharaan infrastruktur ini juga tidak bisa diabaikan. Di banyak negara berkembang, pemerintah sering kali kekurangan anggaran untuk mendanai proyek-proyek pengelolaan air yang penting.

1.9.2 Kesadaran Masyarakat akan Pengelolaan Sungai yang Berkelanjutan

Tantangan lain yang tak kalah penting adalah rendahnya kesadaran masyarakat akan pentingnya pengelolaan sungai yang berkelanjutan. Sungai sering kali dianggap sebagai sumber daya yang dapat dieksploitasi tanpa memikirkan dampak jangka panjangnya terhadap lingkungan dan kesejahteraan masyarakat. Padahal, pengelolaan sungai yang buruk dapat mengakibatkan degradasi ekosistem, penurunan kualitas air, dan peningkatan risiko banjir (Rizki, no date).

Peningkatan kesadaran masyarakat tentang pentingnya pengelolaan sungai secara berkelanjutan harus menjadi bagian integral dari setiap proyek teknik Sungai (Fertel, 2021) (Bega and Cunha, 2024). Masyarakat yang lebih sadar akan pentingnya menjaga sungai cenderung lebih mendukung upaya konservasi dan restorasi.

1.9.3 Tantangan Perubahan Iklim

Perubahan iklim juga menambah kompleksitas tantangan masa depan dalam teknik sungai. Perubahan pola curah hujan, peningkatan suhu, dan kenaikan permukaan air laut telah mempengaruhi siklus hidrologi dan meningkatkan risiko banjir serta erosi (Mannucci, 2024). Teknik sungai modern harus mampu beradaptasi dengan kondisi iklim yang berubah dengan cepat ini. Infrastruktur yang dirancang saat ini harus mempertimbangkan skenario perubahan iklim untuk memastikan daya tahannya di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Arora, N. K. and Mishra, I. (2022) 'Sustainable development goal 6: global water security', *Environmental Sustainability*, 5(3), pp. 271–275.
- Asdak, C. (2023) *Hidrologi dan pengelolaan daerah aliran sungai*. UGM PRESS.
- Asima, H. *et al.* (2022) 'Comparison of vegetation types for prevention of erosion and shallow slope failure on steep slopes in the southeastern USA', *Land*, 11(10), p. 1739.
- Bega, J. M. M. and Cunha, D. G. F. (2024) 'Structural in-situ interventions for the recovery of stream functional aspects: an approach under different hydrological conditions'.
- Bennion, H. and Battarbee, R. (2007) 'The European Union water framework directive: opportunities for palaeolimnology', *Journal of Paleolimnology*, 38, pp. 285–295.
- Bolognesi, T., Pinto, F. S. and Farrelly, M. (2023) *Routledge handbook of urban water governance*. Routledge.
- Butković, H. and Samardžija, V. (2013) 'International Commission for the Protection of the Danube River (ICPDR)'.
- Drill, S. and Post, J. (2022) 'Urban aquatic ecology, restoration, and fishing on the Los Angeles River: Making it just blue enough', in *The Routledge Handbook of Sustainable Cities and Landscapes in the Pacific Rim*. Routledge, pp. 282–298.
- Fairuzzen, M. R. *et al.* (2024) 'Peran Tata Ruang dalam Mitigasi Risiko Pembangunan dan Pencegahan Bencana Alam', *Interdisciplinary Explorations in Research Journal*, 2(3), pp. 1497–1516.
- Fertel, J. A. (2021) *Eco-geomorphic flows: Modification of wet-season dam operations to support downstream salmonid habitat*. University of California, Davis.
- Fuller, I. (no date) 'Towards Strategic Gravel Management Working Report to Environment Southland'.
- Hill, R. J. (2024) 'From Human Threats to Human Solutions: Impacts of Freshwater Runoff Pollution on Rocky Shores and a New Approach to Training Environmental Problem Solvers'. University of California, Irvine.

- Jekel, H. (2005) 'Sustainable water management in Europe—the water framework directive', in *Transboundary Water Resources: Strategies for Regional Security and Ecological Stability: Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Transboundary Water Resources: Strategies for Regional Security and Ecological Stability Novosibirsk, Russia* 25. Springer, pp. 121–127.
- van Koppen, B. (2024) 'Sustainable Development Goal 6: Ensuring the availability and sustainable management of water and sanitation for all', in *Handbook on Public Policy and Food Security*. Edward Elgar Publishing, pp. 165–173.
- Kuma, H. G., Feyessa, F. F. and Demissie, T. A. (2023) 'Assessing the impacts of land use/land cover changes on hydrological processes in Southern Ethiopia: The SWAT model approach', *Cogent Engineering*, 10(1), p. 2199508.
- Mannucci, S. (2024) 'Climate Change Adaptation for the Built Environment: Addressing Urban Flood', in *Climate Adaptation in Urban Planning: Toward Sustainable and Resilient Urban Environments*. Springer, pp. 29–54.
- Maryono, A. (2018) *Reformasi Pengelolaan Sumberdaya Air*. UGM PRESS.
- Noe, G. *et al.* (2024) 'The State of the Science and Practice of Stream Restoration in the Chesapeake: Lessons Learned to Inform Better Implementation, Assessment, and Outcomes'.
- Opperman, J. J. and Galloway, G. E. (2022) 'Nature-based solutions for managing rising flood risk and delivering multiple benefits', *One Earth*, 5(5), pp. 461–465.
- Popescu, I. I. *et al.* (2024) 'Evaluating the Sustainability of Longtime Operating Infrastructure for Romanian Flood Risk Protection'.
- Postel, S. and Richter, B. (2012) *Rivers for life: managing water for people and nature*. Island press.
- Quinton, J. N. and Fiener, P. (2024) 'Soil erosion on arable land: An unresolved global environmental threat', *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 48(1), pp. 136–161.
- Rahmadhani, R. (no date) 'Strategi dan Program Pencegahan Banjir di Indonesia'.

- Rane, N., Choudhary, S. and Rane, J. (2023) 'Leading-edge Artificial Intelligence (AI), Machine Learning (ML), Blockchain, and Internet of Things (IoT) technologies for enhanced wastewater treatment systems', *Machine Learning (ML), Blockchain, and Internet of Things (IoT) technologies for enhanced wastewater treatment systems (October 31, 2023)*.
- Rani, K. and Kumar, A. (2024) 'Biotechnological Innovations in Urban Forestry: Adapting and Mitigating Climate Change and Environmental Pollution', in *Urban Forests, Climate Change and Environmental Pollution*. Springer, pp. 573–591.
- Rizki, M. Y. (no date) 'Restorasi Air Sungai Sebagai Wujud Implementasi River Engineering di Indonesia'.
- Thoms, M. and Fuller, I. (2023) *Resilience and riverine landscapes*. Elsevier.
- Waskitho, N. T. (2024) *PENGELOLAAN DAERAH ALIRAN SUNGAI DI INDONESIA*. UMMPress.
- Wimalaweera, P. V. K. I. (2024) 'Nature Based Solutions for Urban Resilience: Local Governments' Perceptions of Wetlands for Flood Mitigation in Colombo, Sri Lanka'. Ritsumeikan Asia Pacific University.

BAB 2

PRAKTIK PENGELOLAAN SUNGAI YANG BERKELANJUTAN

Oleh Amrullah Mansida

2.1 Pengelolaan Sumber Daya Air Secara Menyeluruh

Pengelolaan sungai dan sumber daya air merupakan aspek krusial dalam menjaga keseimbangan ekosistem dan ketersediaan air untuk berbagai kebutuhan manusia. Pendekatan yang komprehensif dalam pengelolaan ini mencakup seluruh bagian sungai, mulai dari hulu hingga hilir, serta mempertimbangkan interaksi kompleks antara berbagai komponen ekosistem seperti tanah, air, udara, serta flora dan fauna. Pendekatan holistik ini diperlukan untuk memastikan keberlanjutan penggunaan air, meminimalkan dampak negatif seperti polusi, dan menjaga ekosistem sungai dari kerusakan akibat eksploitasi berlebihan.

2.1.1 Pendekatan Holistik dalam Pengelolaan Sungai

Pendekatan holistik dalam pengelolaan sumber daya air menekankan pentingnya mempertimbangkan seluruh ekosistem sungai, dari hulu hingga hilir. Bagian hulu sungai sering kali merupakan wilayah tangkapan air utama, di mana air hujan dan salju meleleh dan mengalir ke sungai. Pengelolaan yang baik di wilayah ini sangat penting karena kerusakan di hulu dapat berdampak besar pada daerah hilir, seperti peningkatan risiko banjir dan penurunan kualitas air.

Pengelolaan berbasis daerah aliran sungai (DAS) memberikan hasil yang lebih efektif dalam menjaga kualitas air dan mencegah banjir (Popescu *et al.*, 2024)(Waskitho, 2024). DAS merupakan unit pengelolaan yang mencakup seluruh ekosistem sungai, dari sumber hingga muara. Pendekatan ini memastikan bahwa setiap intervensi di satu bagian sungai mempertimbangkan dampaknya pada

keseluruhan sistem, termasuk aliran air, pola curah hujan, dan sedimentasi.

2.1.2 Konservasi Air sebagai Bagian dari Pengelolaan Sungai

Konservasi air merupakan salah satu elemen penting dalam pengelolaan sungai yang berkelanjutan. Dengan meningkatnya permintaan akan air akibat pertumbuhan populasi dan urbanisasi, pengelolaan air secara efisien menjadi semakin penting. Upaya konservasi mencakup penggunaan air secara bijaksana, pengelolaan sumber air secara optimal, serta pencegahan pemborosan air di berbagai sektor seperti pertanian, industri, dan domestik.

Upaya konservasi air yang diterapkan di sepanjang DAS dapat mengurangi stres pada ekosistem sungai, terutama di daerah-daerah yang rentan terhadap kekeringan (Postel and Richter, 2012)(Waskitho, 2024). Konservasi air juga dapat membantu menjaga kualitas air dengan mengurangi volume limbah yang dibuang ke sungai, serta mengurangi tekanan pada infrastruktur pengelolaan air seperti bendungan dan tanggul.

2.1.2 Pengendalian Polusi dalam Pengelolaan Sungai

Polusi merupakan salah satu tantangan terbesar dalam pengelolaan sumber daya air. Limbah industri, pertanian, dan domestik sering kali mengalir ke sungai dan menyebabkan penurunan kualitas air. Polusi dapat merusak ekosistem sungai, mengganggu kehidupan akuatik, dan mengancam kesehatan masyarakat yang bergantung pada sungai untuk kebutuhan air sehari-hari.

Pengendalian polusi sungai harus dilakukan dengan pendekatan terpadu yang mencakup pencegahan, mitigasi, dan pemulihan (Tullos *et al.*, 2021)(Mannucci, 2024). Misalnya, penggunaan teknologi biofilter di lahan pertanian dapat membantu menyaring nutrisi berlebih seperti nitrogen dan fosfor yang dapat mencemari sungai. Selain itu, sistem pengolahan limbah industri dan domestik yang lebih canggih juga diperlukan untuk memastikan bahwa limbah yang dibuang ke sungai telah melalui proses pengolahan yang memadai.

2.1.3 Pemanfaatan Sumber Daya Air yang Berkelanjutan

Pemanfaatan sumber daya air secara berkelanjutan adalah kunci dalam menjaga keseimbangan antara kebutuhan manusia dan kelestarian lingkungan. Pengelolaan air yang berkelanjutan mencakup pemanfaatan air yang efisien dan adil untuk berbagai sektor, seperti pertanian, industri, dan kebutuhan domestik, tanpa merusak ekosistem sungai. Hal ini mencakup pemanfaatan teknologi irigasi yang lebih efisien, pengelolaan permintaan air di sektor industri, serta edukasi kepada masyarakat untuk mengurangi pemborosan air(Waskitho, 2024).

Strategi pemanfaatan air yang berkelanjutan adalah dengan mengoptimalkan infrastruktur pengelolaan air, seperti bendungan dan saluran irigasi, agar dapat memenuhi kebutuhan masyarakat tanpa merusak ekosistem Sungai (Asima *et al.*, 2022)(Gaskin, Lacey and MacVicar, no date). Selain itu, penerapan sistem tata kelola air yang adil juga penting untuk memastikan bahwa semua pihak mendapatkan akses air yang cukup, terutama di daerah yang rawan kekeringan atau bencana air lainnya.

2.1.3 Pendekatan Adaptif dalam Pengelolaan Sungai

Dalam konteks perubahan iklim, pengelolaan sungai perlu mempertimbangkan pendekatan adaptif yang memungkinkan fleksibilitas dalam menghadapi tantangan seperti peningkatan curah hujan, banjir yang lebih sering, dan perubahan pola aliran sungai. Pendekatan adaptif mencakup penggunaan teknologi untuk memantau kondisi sungai secara real-time, sehingga tindakan mitigasi dapat diambil sebelum terjadi bencana. Sistem peringatan dini berbasis data juga dapat membantu masyarakat mempersiapkan diri menghadapi banjir dan bencana air lainnya. Pendekatan adaptif yang menggunakan teknologi pemantauan real-time telah meningkatkan ketahanan infrastruktur sungai dan mengurangi dampak perubahan iklim pada masyarakat yang tinggal di daerah sekitar sungai. Penerapan pendekatan ini juga memungkinkan pengelolaan air yang lebih responsif dan berkelanjutan(Bolognesi, Pinto and Farrelly, 2023)(Gaskin, Lacey and MacVicar, no date).

2.2 Penerapan Solusi Berbasis Alam (*Nature-Based Solutions*) dalam Teknik Sungai

Solusi berbasis alam (*Nature-Based Solutions, NBS*) telah menjadi pendekatan yang semakin diakui dalam pengelolaan sumber daya air dan teknik Sungai (de Jesús Arce-Mojica *et al.*, 2019). NBS mencakup berbagai tindakan yang memanfaatkan proses dan ekosistem alami untuk mencapai tujuan seperti mitigasi banjir, peningkatan kualitas air, dan pemulihan ekosistem. (O'Hogain *et al.*, 2018) Pendekatan ini mencakup restorasi lahan basah, hutan riparian, dan naturalisasi aliran sungai, yang tidak hanya lebih ramah lingkungan tetapi juga lebih adaptif terhadap perubahan iklim. Dibandingkan dengan infrastruktur keras seperti bendungan dan tanggul, solusi berbasis alam lebih fleksibel dan berkelanjutan, serta mampu memberikan manfaat jangka panjang bagi lingkungan dan masyarakat.

2.2.1 Restorasi Lahan Basah sebagai Solusi Berbasis Alam

Lahan basah memainkan peran penting dalam menyerap kelebihan air hujan dan mengurangi risiko banjir. Restorasi lahan basah melibatkan pemulihan ekosistem lahan basah yang telah terdegradasi agar kembali berfungsi secara alami. Lahan basah dapat menyerap dan menyimpan air hujan dalam jumlah besar, sehingga mengurangi tekanan pada sistem sungai selama musim hujan. Selain itu, lahan basah juga berfungsi sebagai penyaring alami yang dapat meningkatkan kualitas air dengan menyerap polutan seperti nutrisi berlebih dari lahan pertanian dan limbah industri. Restorasi lahan basah telah terbukti efektif dalam mengurangi risiko banjir di daerah perkotaan dan pedesaan (Gong *et al.*, 2024). Lahan basah yang dipulihkan dapat meningkatkan daya serap air hingga 40%, mengurangi beban pada sistem drainase perkotaan, dan membantu mencegah banjir bandang. Lahan basah juga mendukung keanekaragaman hayati dengan menyediakan habitat bagi berbagai spesies flora dan fauna.

2.2.2 Hutan Riparian sebagai Penahan Banjir dan Penyaring Alami

Hutan riparian adalah hutan yang tumbuh di sepanjang tepi sungai, yang memiliki peran penting dalam menstabilkan bantaran sungai, mencegah erosi, serta menyaring polutan sebelum masuk ke sungai. Restorasi hutan riparian melibatkan penanaman kembali vegetasi asli di sepanjang sungai yang telah terdegradasi akibat aktivitas manusia, seperti pertanian intensif dan urbanisasi. Hutan riparian mampu memperlambat aliran air permukaan, yang membantu mengurangi risiko banjir, serta memperbaiki kualitas air dengan menyaring sedimen dan polutan (Mutiani *et al.*, 2024).

Hutan riparian yang sehat mampu mengurangi erosi tebing sungai hingga 60% dibandingkan dengan daerah yang tidak memiliki penutup vegetasi (Mira *et al.*, 2022). Sistem akar pohon yang dalam membantu menstabilkan tanah di sepanjang tepi sungai, sehingga mengurangi risiko longsor dan erosi. Selain itu, hutan riparian juga berfungsi sebagai penyangga antara lahan pertanian atau pemukiman dengan sungai, yang membantu menyerap nutrisi berlebih dan polutan sebelum mencapai aliran sungai.

2.2.3 Naturalisasi Aliran Sungai

Naturalisasi aliran sungai adalah upaya untuk mengembalikan sungai ke jalur dan kondisi alaminya setelah mengalami perubahan akibat pembangunan infrastruktur seperti kanal atau bendungan. Naturalisasi melibatkan pemulihan aliran sungai yang lebih bebas dan dinamis, yang memungkinkan sungai untuk bermigrasi dan berubah secara alami sesuai dengan perubahan iklim dan curah hujan. Proses ini sering kali mencakup penghilangan penghalang buatan seperti bendungan kecil atau kanal, serta pemulihan habitat alami di sepanjang sungai.

Menaturalisasi aliran sungai memiliki manfaat yang signifikan dalam memperbaiki kualitas air, meningkatkan keanekaragaman hayati, dan mengurangi risiko banjir (Fairuzzen *et al.*, 2024) (Postel and Richter, 2012). Sungai yang dinaturalisasi cenderung memiliki aliran yang lebih lambat, yang membantu mengurangi kecepatan air selama banjir dan memungkinkan air untuk meresap ke dalam tanah, mengurangi risiko banjir di daerah hilir. Selain itu, aliran

sungai yang lebih alami membantu mengurangi erosi dan memperbaiki habitat bagi spesies akuatik.

Naturalisasi juga memungkinkan sungai untuk beradaptasi dengan perubahan iklim, karena sungai yang dinaturalisasi lebih mampu menyesuaikan diri dengan perubahan pola curah hujan dan peningkatan debit air. Pendekatan ini lebih berkelanjutan dibandingkan dengan upaya kanal dan pengaturan aliran yang kaku, karena memungkinkan sungai untuk berfungsi secara alami tanpa perlu intervensi manusia yang intensif.

2.3 Perancangan Infrastruktur yang Adaptif dalam Teknik Sungai

Perubahan iklim telah membawa tantangan besar dalam perancangan infrastruktur teknik sungai. Peningkatan curah hujan yang tidak menentu dan frekuensi banjir yang semakin tinggi menuntut perancangan infrastruktur yang lebih adaptif dan fleksibel. Infrastruktur seperti bendungan, tanggul, dan kanal yang selama ini berperan dalam mengendalikan aliran air harus dirancang untuk mampu menghadapi skenario perubahan iklim yang tidak dapat diprediksi. Pendekatan ini menuntut penerapan teknologi canggih, metode perencanaan yang fleksibel, dan integrasi dengan solusi berbasis alam untuk meningkatkan ketahanan dan daya adaptasi infrastruktur Sungai (Suprayogi, Purnama and Darmanto, 2024).

2.3.1 Adaptasi Terhadap Perubahan Iklim

Perubahan iklim membawa dampak yang semakin nyata terhadap pola cuaca global, terutama dengan curah hujan yang semakin ekstrem. Di banyak wilayah, peningkatan curah hujan dalam waktu singkat menyebabkan banjir bandang dan erosi sungai yang lebih cepat. Oleh karena itu, desain infrastruktur sungai seperti bendungan, tanggul, dan kanal harus mampu menyesuaikan diri dengan kondisi cuaca yang berubah-ubah dan menghadapi skenario terburuk yang mungkin terjadi.

Adaptasi terhadap perubahan iklim memerlukan perencanaan infrastruktur yang fleksibel dan modular. Misalnya, bendungan dapat dirancang dengan fitur penyesuaian volume air,

yang memungkinkan pelepasan air secara bertahap untuk mengurangi risiko banjir di hilir (Mannucci, 2024). Tanggul yang diperkuat dengan vegetasi alami juga dapat berfungsi lebih efektif dalam menahan laju air dan mencegah erosi dibandingkan dengan tanggul beton yang kaku.

2.3.2 Desain Bendungan Adaptif

Bendungan adalah salah satu infrastruktur teknik sungai yang paling penting dalam pengelolaan air dan mitigasi banjir. Namun, dengan meningkatnya intensitas curah hujan akibat perubahan iklim, bendungan harus dirancang agar lebih adaptif. Bendungan yang adaptif tidak hanya mengendalikan aliran air tetapi juga mampu menyesuaikan kapasitasnya terhadap perubahan volume air secara dinamis.

Bendungan adaptif harus dilengkapi dengan sistem pemantauan *real-time* yang dapat mengukur ketinggian air, debit aliran, dan curah hujan di hulu secara terus menerus (Bolognesi, Pinto and Farrelly, 2023). Data ini digunakan untuk menentukan kapan dan seberapa banyak air harus dilepaskan dari bendungan untuk mencegah banjir di hilir. Dengan menggunakan teknologi pemantauan yang canggih, bendungan dapat merespons perubahan cuaca dengan lebih cepat dan efisien.

2.3.3 Tanggul yang Fleksibel dan Ramah Lingkungan

Tanggul adalah struktur penting lainnya dalam teknik sungai yang dirancang untuk melindungi daerah pemukiman dan lahan pertanian dari risiko banjir. Namun, tantangan perubahan iklim menuntut tanggul yang lebih fleksibel, tidak hanya untuk menahan aliran air yang lebih besar tetapi juga untuk beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang berubah.

Tanggul berbasis vegetasi atau bioengineering dapat menjadi alternatif yang lebih adaptif dibandingkan tanggul beton tradisional (Bolognesi, Pinto and Farrelly, 2023). Tanggul berbasis vegetasi memungkinkan air untuk meresap ke dalam tanah, yang mengurangi tekanan pada struktur tanggul itu sendiri. Selain itu, vegetasi yang ditanam di sepanjang tanggul membantu

memperkuat tanah dan mencegah erosi, serta menyediakan habitat bagi flora dan fauna lokal.

Selain itu, tanggul fleksibel juga dapat dirancang dengan kemampuan untuk diperluas atau ditinggikan seiring dengan meningkatnya risiko banjir akibat perubahan iklim. Dengan merancang tanggul yang mudah dimodifikasi, pemerintah dan pemangku kepentingan dapat merespons perubahan pola cuaca tanpa harus membangun ulang seluruh infrastruktur.

2.3.4 Kanal Banjir dan Sistem Drainase Adaptif

Kanal banjir adalah infrastruktur yang dirancang untuk mengalihkan aliran air selama musim hujan dan mencegah banjir di daerah perkotaan. Namun, kanal banjir yang dirancang secara tradisional sering kali tidak mampu menghadapi curah hujan yang ekstrem akibat perubahan iklim. Oleh karena itu, kanal banjir yang adaptif harus dirancang dengan mempertimbangkan skenario peningkatan debit air yang lebih besar di masa depan.

Sistem drainase adaptif yang dilengkapi dengan teknologi pemantauan real-time dan pengaturan aliran otomatis mampu meningkatkan efisiensi kanal banjir dalam mengatasi volume air yang meningkat. Kanal banjir yang adaptif juga harus dirancang untuk mengurangi risiko limpasan air yang membawa polutan ke sungai, yang dapat merusak kualitas air (Fairuzzen *et al.*, 2024).

Sistem drainase yang efisien juga perlu diintegrasikan dengan ruang terbuka hijau dan infrastruktur ramah lingkungan lainnya yang dapat menyerap air hujan dan mengurangi tekanan pada sistem kanal selama musim hujan. Dengan demikian, kanal banjir yang adaptif tidak hanya berfungsi untuk mengalihkan air, tetapi juga membantu menjaga kualitas lingkungan perkotaan.

2.4 Pemanfaatan Teknologi untuk Pengelolaan Data dalam Teknik Sungai

Teknologi modern telah membawa revolusi dalam cara pengelolaan sungai dan sumber daya air dilakukan. Sensor *Internet of Things* (IoT) dan penginderaan jauh merupakan dua teknologi utama yang telah diadopsi secara luas dalam pengumpulan data real-time tentang kondisi sungai. Selain itu, perkembangan

teknologi data besar (big data) memungkinkan pengumpulan dan analisis data dalam jumlah besar dengan lebih cepat dan efisien (Rane, Choudhary and Rane, 2023). Pengelolaan data yang efektif menjadi kunci untuk pengambilan keputusan yang lebih tepat dalam mitigasi risiko banjir, manajemen kualitas air, dan pemulihan ekosistem. Dengan pemanfaatan teknologi yang tepat, pengelola sungai dapat merespons perubahan kondisi lingkungan dengan lebih cepat dan efektif.

2.4.1 Sensor IoT untuk Pengumpulan Data Real-Time

Sensor IoT telah menjadi komponen penting dalam pengelolaan sungai yang adaptif. Sensor ini dapat dipasang di berbagai titik sepanjang aliran sungai untuk memantau parameter-parameter penting seperti ketinggian air, kecepatan aliran, suhu air, serta kualitas air. Data yang dikumpulkan secara real-time ini kemudian dikirimkan ke pusat pengolahan data melalui jaringan komunikasi, sehingga memungkinkan pengelola sungai untuk memantau kondisi sungai secara terus-menerus dan merespons perubahan dengan cepat.

Penggunaan sensor IoT dalam pengelolaan banjir telah meningkatkan efisiensi dan akurasi dalam memprediksi risiko banjir (Ngo, 2022). Sensor ini memungkinkan pengelola air untuk memantau kondisi sungai selama curah hujan tinggi dan memberikan peringatan dini kepada masyarakat yang tinggal di daerah rawan banjir. Dengan demikian, sensor IoT dapat membantu mengurangi dampak bencana alam dan menyelamatkan nyawa serta infrastruktur.

Selain itu, sensor IoT juga dapat digunakan untuk memantau kualitas air, seperti tingkat polusi atau konsentrasi nutrisi dalam air. Data ini penting untuk memastikan bahwa sungai tetap sehat dan aman untuk digunakan, baik oleh manusia maupun ekosistem di sekitarnya. (Rane, Choudhary and Rane, 2023) Dengan pemantauan yang lebih akurat dan terus menerus, pengelola air dapat mengambil tindakan segera untuk mengatasi masalah polusi atau kontaminasi sebelum menjadi masalah yang lebih besar.

2.4.2 Penginderaan Jauh untuk Pemantauan Ekosistem

Penginderaan jauh adalah teknologi lain yang semakin banyak digunakan dalam pengelolaan sungai. Melalui satelit atau pesawat tak berawak (drone), penginderaan jauh memungkinkan pengumpulan data skala besar tentang kondisi ekosistem sungai dan sekitarnya. Teknologi ini sangat berguna untuk memantau perubahan morfologi sungai, seperti erosi tebing, sedimentasi, dan perubahan vegetasi di sekitar sungai.

Penginderaan jauh telah menjadi alat yang sangat berguna dalam pemantauan ekosistem sungai, terutama di daerah yang sulit diakses. Data dari penginderaan jauh dapat digunakan untuk membuat peta spasial yang menunjukkan daerah yang mengalami degradasi atau berisiko terkena bencana alam. Peta ini membantu pengelola sungai dalam perencanaan proyek restorasi dan pemulihan ekosistem secara lebih tepat (Phillips and Marden, 2005)(Manakane, Rakuasa and Latue, 2023).

Selain itu, penginderaan jauh juga berguna untuk memantau dampak proyek teknik sungai seperti restorasi lahan basah atau pembangunan bendungan. Dengan menggunakan data citra satelit yang diperbarui secara berkala, pengelola dapat melacak perkembangan proyek dan menilai efektivitasnya dalam memperbaiki kualitas air dan mengurangi risiko banjir.

2.4.3 Pengelolaan Big Data dalam Teknik Sungai

Teknologi sensor IoT dan penginderaan jauh menghasilkan data dalam jumlah besar yang membutuhkan pengelolaan yang efisien. Data besar (big data) yang dihasilkan dari pemantauan sungai mencakup berbagai jenis data seperti kondisi hidrologi, kualitas air, serta informasi lingkungan lainnya (Rane, Choudhary and Rane, 2023). Tantangan utama dari big data adalah bagaimana mengelola dan menganalisis data yang sangat besar ini untuk mendapatkan wawasan yang dapat digunakan dalam pengambilan keputusan.

Pengelolaan big data yang efektif dalam teknik sungai membutuhkan infrastruktur komputasi yang canggih serta algoritma analitik yang mampu memproses data dalam waktu nyata. Teknologi *cloud computing* dan machine learning telah mulai

digunakan untuk mengelola data dari berbagai sumber dan mengidentifikasi pola atau tren yang dapat digunakan untuk memprediksi risiko atau merencanakan intervensi (Opperman and Galloway, 2022) (Bolyard, 2024). Misalnya, algoritma machine learning dapat digunakan untuk menganalisis data historis tentang banjir dan curah hujan untuk memprediksi risiko banjir di masa depan. Data yang dihasilkan dari prediksi ini dapat membantu pengelola sungai dalam merancang strategi mitigasi yang lebih efektif dan merencanakan penggunaan sumber daya air secara lebih efisien.

2.4.4 Pengambilan Keputusan Berdasarkan Data

Salah satu manfaat utama dari teknologi pengelolaan data adalah kemampuannya untuk memberikan informasi yang akurat dan terkini bagi pengambil keputusan. Data real-time yang dikumpulkan dari sensor IoT dan penginderaan jauh dapat dianalisis secara langsung untuk memberikan gambaran tentang kondisi sungai saat ini dan potensi risiko yang mungkin terjadi di masa depan. Hal ini memungkinkan pengelola sungai untuk mengambil tindakan mitigasi yang lebih cepat dan lebih tepat sasaran.

Pengambilan keputusan berbasis data adalah kunci dalam pengelolaan sungai yang berkelanjutan. Dengan data yang lebih akurat dan terperinci, pengelola dapat membuat keputusan yang didasarkan pada bukti, bukan asumsi. Ini sangat penting dalam konteks perubahan iklim, di mana pola curah hujan dan risiko banjir menjadi semakin sulit diprediksi. Data yang tepat waktu memungkinkan respons yang lebih baik terhadap tantangan lingkungan yang semakin kompleks.

2.5 Partisipasi dan Edukasi Masyarakat dalam Pengelolaan Sungai Berkelanjutan

Pengelolaan sungai berkelanjutan tidak hanya bergantung pada kebijakan pemerintah dan penerapan teknologi, tetapi juga pada partisipasi aktif dari masyarakat. Kesadaran masyarakat tentang pentingnya menjaga sungai sebagai sumber daya vital bagi kehidupan sehari-hari dan ekosistem menjadi kunci dalam

memastikan bahwa proyek-proyek konservasi dan restorasi sungai berjalan dengan sukses. Partisipasi aktif masyarakat serta program edukasi yang terarah dapat mendorong perubahan perilaku, meningkatkan dukungan terhadap kebijakan lingkungan, dan memperkuat inisiatif pelestarian sumber daya air (Asdak, 2023).

2.5.1 Peningkatan Kesadaran Masyarakat melalui Edukasi

Pendidikan adalah langkah pertama dalam meningkatkan kesadaran masyarakat tentang pentingnya pengelolaan sungai yang berkelanjutan. Masyarakat sering kali tidak menyadari dampak negatif dari perilaku sehari-hari, seperti pembuangan sampah sembarangan dan penggunaan air yang berlebihan, terhadap kesehatan ekosistem sungai. Oleh karena itu, program edukasi yang baik perlu dirancang untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang hubungan antara tindakan manusia dan dampaknya terhadap sungai dan lingkungan sekitarnya.

Program edukasi lingkungan yang menyoar komunitas lokal sangat penting dalam meningkatkan kesadaran akan pentingnya pengelolaan sungai. Program-program ini dapat disampaikan melalui sekolah, kampanye publik, dan kegiatan berbasis masyarakat seperti lokakarya dan seminar. Masyarakat perlu memahami bahwa pengelolaan sungai bukan hanya tanggung jawab pemerintah, tetapi juga merupakan tanggung jawab bersama untuk menjaga kebersihan dan kesehatan Sungai (Postel and Richter, 2012)(Tullos *et al.*, 2021).

Selain itu, program edukasi juga dapat menggunakan teknologi modern seperti media sosial, aplikasi ponsel pintar, dan platform online untuk menjangkau audiens yang lebih luas. Dengan memanfaatkan teknologi digital, informasi tentang pentingnya pengelolaan sungai dan tips praktis tentang bagaimana masyarakat dapat terlibat dalam pelestarian dapat disebarkan dengan cepat dan efisien.

2.5.2 Partisipasi Masyarakat dalam Pemeliharaan Sungai

Partisipasi masyarakat dalam pengelolaan sungai berkelanjutan dapat diwujudkan melalui berbagai kegiatan langsung, seperti membersihkan sungai, menanam pohon di

sepanjang tepi sungai, atau berpartisipasi dalam proyek restorasi habitat alami. Ketika masyarakat terlibat secara langsung dalam kegiatan-kegiatan ini, mereka tidak hanya belajar tentang pentingnya sungai tetapi juga merasa memiliki tanggung jawab atas keberlanjutannya. Keterlibatan langsung ini juga dapat meningkatkan rasa keterikatan masyarakat terhadap lingkungan lokal mereka, yang pada akhirnya menciptakan dukungan jangka panjang untuk inisiatif pelestarian.

Partisipasi aktif masyarakat dalam proyek restorasi sungai telah terbukti meningkatkan keberhasilan proyek secara signifikan. Proyek-proyek yang melibatkan masyarakat lokal cenderung lebih berkelanjutan karena masyarakat memiliki pengetahuan lokal yang penting dan dapat berkontribusi secara aktif dalam pemeliharaan jangka Panjang (Postel and Richter, 2012). Misalnya, di beberapa daerah, masyarakat lokal yang dilatih untuk memantau kualitas air sungai dapat membantu mendeteksi masalah polusi lebih awal dan memberikan laporan kepada pihak berwenang sebelum masalah tersebut menjadi lebih parah.

2.5.3 Pengaruh Partisipasi Masyarakat Terhadap Kebijakan Pengelolaan Sungai

Partisipasi masyarakat juga dapat memengaruhi kebijakan lingkungan di tingkat lokal dan nasional. Ketika masyarakat menyadari dampak dari kerusakan sungai terhadap kehidupan mereka, mereka cenderung lebih proaktif dalam mendukung kebijakan yang bertujuan untuk melindungi dan memulihkan ekosistem sungai. Kampanye advokasi yang dipimpin oleh masyarakat dapat memainkan peran penting dalam mendorong pemerintah untuk mengadopsi kebijakan yang lebih pro-lingkungan.

Masyarakat yang terlibat secara aktif dalam pengelolaan sungai sering kali menjadi agen perubahan yang kuat dalam membentuk kebijakan lingkungan (Muktiali, 2018). Misalnya, di banyak negara, komunitas lokal telah berhasil melobi untuk perlindungan yang lebih ketat terhadap daerah aliran sungai (DAS), serta mengusulkan regulasi yang lebih ketat terhadap polusi industri yang berdampak pada sungai. Partisipasi aktif ini juga dapat

mendorong kolaborasi antara masyarakat, pemerintah, dan sektor swasta untuk menciptakan solusi berbasis komunitas yang lebih sesuai dengan kebutuhan lokal.

2.5.4 Tantangan dalam Menggalakkan Partisipasi Masyarakat

Meskipun partisipasi masyarakat memiliki banyak manfaat, menggalakkan keterlibatan aktif masyarakat dalam pengelolaan sungai sering kali menghadapi berbagai tantangan. Salah satu tantangan utama adalah kurangnya kesadaran dan pemahaman tentang pentingnya pengelolaan sungai. Banyak orang mungkin tidak melihat hubungan langsung antara perilaku mereka dan kondisi sungai, terutama jika mereka tinggal jauh dari sungai atau tidak secara langsung bergantung pada sungai untuk kebutuhan sehari-hari (Muktiali, 2018).

Kurangnya dukungan finansial dan sumber daya juga sering menjadi hambatan dalam mengimplementasikan program-program partisipatif. Organisasi lokal dan pemerintah sering kali kekurangan dana untuk mengadakan kegiatan yang melibatkan masyarakat atau menjalankan program edukasi jangka Panjang (Fertel, 2021). Selain itu, ketidakpercayaan terhadap pemerintah atau pihak otoritas sering kali menjadi penghalang bagi partisipasi masyarakat dalam proyek-proyek lingkungan.

2.6 Kolaborasi Lintas Sektor dalam Pengelolaan Sungai Berkelanjutan

Pengelolaan sungai yang efektif dan berkelanjutan tidak dapat dicapai tanpa adanya koordinasi antara berbagai pemangku kepentingan. Kolaborasi lintas sektor menjadi elemen kunci dalam upaya pelestarian dan pengelolaan sumber daya air yang holistik. Pemerintah, sektor swasta, masyarakat lokal, serta organisasi non-pemerintah (NGO) harus bekerja bersama untuk merencanakan, mengimplementasikan, dan memantau proyek pengelolaan sungai. Koordinasi yang baik antar pemangku kepentingan ini dapat memastikan bahwa setiap pihak memiliki peran yang jelas dan dapat berkontribusi secara optimal untuk mencapai tujuan pengelolaan sungai yang berkelanjutan.

2.6.1 Pentingnya Kolaborasi dalam Pengelolaan Sungai

Pengelolaan sungai yang berkelanjutan memerlukan pendekatan yang terintegrasi, di mana berbagai sektor berperan aktif dalam mengelola seluruh aspek terkait sumber daya air. Sungai bukan hanya bagian dari ekosistem alam tetapi juga melibatkan berbagai kepentingan, termasuk pemenuhan kebutuhan air untuk pertanian, industri, domestik, serta pariwisata dan rekreasi. Dengan demikian, kolaborasi lintas sektor sangat penting untuk menciptakan solusi yang holistik dan mencegah konflik kepentingan (Rahmadhani, no date).

Proyek pengelolaan sungai yang melibatkan kerjasama antara pemerintah, masyarakat, dan sektor swasta cenderung lebih berhasil dalam jangka panjang. Pemerintah bertindak sebagai regulator yang menetapkan kebijakan, sementara sektor swasta dan masyarakat berperan dalam implementasi proyek-proyek pelestarian sungai (Bolognesi, Pinto and Farrelly, 2023). Pendekatan ini tidak hanya mendorong efisiensi dalam alokasi sumber daya, tetapi juga memperkuat partisipasi masyarakat lokal yang merasa terlibat dalam upaya pelestarian sumber daya air.

2.6.2 Peran Pemerintah dalam Kolaborasi Lintas Sektor

Pemerintah memegang peran penting sebagai koordinator utama dalam pengelolaan sungai lintas sektor. Kebijakan yang jelas dan regulasi yang mendukung pengelolaan sumber daya air sangat penting untuk memastikan bahwa semua sektor beroperasi dalam kerangka kerja yang sama. Pemerintah dapat memfasilitasi forum dialog antara sektor swasta, masyarakat, dan organisasi non-pemerintah untuk mendorong kolaborasi yang lebih baik.

Regulasi yang jelas dan transparan dari pemerintah dapat mendorong sektor swasta untuk berinvestasi dalam proyek pengelolaan air yang lebih ramah lingkungan. Misalnya, insentif pajak bagi perusahaan yang terlibat dalam proyek restorasi sungai atau yang menerapkan praktik penggunaan air yang berkelanjutan dapat mempercepat adopsi praktik terbaik di sektor industri (Postel and Richter, 2012).

Selain itu, pemerintah memiliki peran penting dalam memastikan bahwa proyek pengelolaan sungai mengikuti standar

yang ketat terkait perlindungan lingkungan. Pengawasan regulasi ini memastikan bahwa kegiatan sektor swasta tidak merusak ekosistem sungai dan bahwa proyek-proyek tersebut dijalankan secara berkelanjutan.

2.6.3 Sektor Swasta dan Kontribusinya dalam Pengelolaan Sungai

Sektor swasta juga memiliki peran besar dalam pengelolaan sungai, terutama dalam hal investasi dan teknologi. Banyak perusahaan besar, terutama yang bergantung pada sumber daya air, mulai menyadari pentingnya menjaga kelestarian sungai sebagai bagian dari tanggung jawab sosial perusahaan (CSR). Perusahaan dapat memberikan kontribusi melalui pendanaan proyek restorasi, teknologi pengelolaan air yang lebih efisien, dan program pelatihan bagi masyarakat lokal.

Sektor swasta memiliki potensi besar dalam mendukung pengelolaan air melalui inovasi teknologi, seperti teknologi pengolahan limbah industri yang lebih bersih atau sistem irigasi yang lebih hemat air (Murgatroyd and Dadson, 2019). Dengan teknologi yang lebih canggih, perusahaan dapat mengurangi jejak air mereka dan mendukung upaya pelestarian sungai. Selain itu, kolaborasi dengan pemerintah dalam hal regulasi dan insentif juga dapat memperkuat komitmen sektor swasta untuk berpartisipasi dalam inisiatif keberlanjutan.

2.6.4 Masyarakat sebagai Pemangku Kepentingan Utama

Masyarakat lokal sering kali menjadi aktor yang paling terdampak oleh pengelolaan sungai, sehingga partisipasi mereka dalam kolaborasi lintas sektor menjadi sangat penting. Edukasi dan pelibatan masyarakat dalam proyek-proyek pengelolaan sungai dapat memperkuat keberhasilan proyek-proyek tersebut. Ketika masyarakat merasa memiliki tanggung jawab dan kepentingan langsung dalam menjaga sungai, mereka cenderung lebih mendukung proyek pelestarian dan menjaga keberlanjutan jangka panjang.

Proyek pengelolaan sungai yang melibatkan masyarakat lokal dalam tahap perencanaan dan implementasi lebih mungkin berhasil.

Masyarakat lokal memiliki pengetahuan yang unik tentang kondisi lokal dan tantangan yang dihadapi, yang bisa menjadi sumber informasi penting untuk memformulasikan solusi yang lebih sesuai dengan konteks setempat (Hill, 2024). Selain itu, partisipasi masyarakat juga membantu membangun rasa kepemilikan terhadap proyek-proyek yang dijalankan, sehingga meningkatkan kesadaran lingkungan dan pelestarian ekosistem sungai.

2.6.5 Tantangan dalam Kolaborasi Lintas Sektor

Meskipun kolaborasi lintas sektor penting, ada berbagai tantangan yang sering kali menghambat implementasi pengelolaan sungai yang holistik. Salah satu tantangan utama adalah perbedaan prioritas di antara berbagai sektor. Pemerintah mungkin fokus pada regulasi, sementara sektor swasta lebih tertarik pada keuntungan ekonomi, dan masyarakat mungkin memiliki kepentingan yang berbeda lagi. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan kolaboratif yang dapat menyatukan berbagai kepentingan tersebut ke dalam tujuan yang sama.

Koordinasi lintas sektor yang buruk dapat menghambat upaya-upaya konservasi sungai. Kurangnya komunikasi dan kolaborasi yang efektif antara pemangku kepentingan dapat mengakibatkan proyek-proyek yang tidak berjalan dengan baik atau tidak sesuai dengan kebutuhan lokal (Murgatroyd and Dadson, 2019). Untuk mengatasi tantangan ini, dibutuhkan mekanisme dialog dan partisipasi yang kuat, di mana setiap pihak dapat menyuarakan pendapat mereka dan berkontribusi dalam proses pengambilan keputusan.

2.7 Adaptasi Terhadap Perubahan Iklim dalam Teknik Sungai

Perubahan iklim telah membawa perubahan signifikan pada pola cuaca global, yang berdampak pada sistem sungai di berbagai belahan dunia. Salah satu dampak yang paling terlihat adalah peningkatan intensitas dan frekuensi banjir serta erosi sungai. Fenomena ini menuntut perubahan dalam pendekatan pengelolaan sungai, di mana teknik sungai harus mempertimbangkan kondisi iklim yang dinamis dan berubah-ubah. Solusi yang adaptif dan

berkelanjutan menjadi kebutuhan mendesak untuk menjaga kelestarian ekosistem sungai dan melindungi masyarakat yang bergantung pada sungai sebagai sumber daya vital.

2.7.1 Dampak Perubahan Iklim terhadap Sistem Sungai

Perubahan iklim telah mengubah siklus hidrologi di seluruh dunia, menyebabkan curah hujan yang lebih ekstrem dan tidak terduga. Banjir yang lebih sering dan intens menjadi masalah utama di banyak daerah, terutama di wilayah perkotaan dan dataran rendah. Curah hujan ekstrem dalam beberapa dekade terakhir telah meningkatkan frekuensi banjir besar di beberapa sungai utama di dunia, yang mengancam infrastruktur, lahan pertanian, dan keselamatan manusia (Murgatroyd and Dadson, 2019).

Selain banjir, erosi sungai juga menjadi semakin parah akibat curah hujan yang meningkat. Ketika aliran air sungai menjadi lebih deras selama banjir, tanah di sepanjang tepi sungai menjadi lebih rentan terhadap erosi. Ini tidak hanya mengancam ekosistem alami di sepanjang sungai, tetapi juga merusak lahan pertanian dan infrastruktur yang dibangun di dekat sungai.

2.7.2 Solusi Adaptif dalam Teknik Sungai

Untuk menghadapi dampak perubahan iklim, pendekatan teknik sungai yang lebih adaptif diperlukan. Desain infrastruktur seperti bendungan, tanggul, dan kanal harus dirancang untuk dapat menahan volume air yang lebih besar dan menghadapi banjir yang lebih sering. Bendungan modern, misalnya, harus dilengkapi dengan sistem pengelolaan air yang fleksibel dan otomatis, yang memungkinkan pelepasan air secara terkendali untuk mengurangi tekanan pada infrastruktur selama musim hujan.

Pentingnya sistem drainase yang lebih adaptif di kota-kota besar untuk menghadapi peningkatan curah hujan. Sistem drainase yang dirancang secara dinamis dan terintegrasi dengan ruang terbuka hijau dapat membantu menyerap air hujan dengan lebih efektif, mengurangi risiko banjir perkotaan (Mannucci, 2024). Selain itu, restorasi sungai alami dengan pendekatan bioengineering, di mana vegetasi alami digunakan untuk menstabilkan tebing sungai

dan menyerap air berlebih, juga terbukti efektif dalam mengurangi erosi dan memperbaiki kualitas air.

2.7.3 Pengelolaan Berbasis Alam sebagai Solusi Adaptif

Solusi berbasis alam (*Nature-Based Solutions*, NBS) semakin diakui sebagai pendekatan adaptif yang efektif dalam menghadapi perubahan iklim. Restorasi lahan basah, pembentukan hutan riparian, dan naturalisasi aliran sungai adalah beberapa contoh NBS yang mampu meningkatkan daya tahan sungai terhadap perubahan iklim. Lahan basah, misalnya, dapat menyerap air hujan dalam jumlah besar, mengurangi risiko banjir di hilir, serta menyaring polutan dari air yang mengalir ke sungai (de Jesús Arce-Mojica *et al.*, 2019).

Proyek restorasi lahan basah di beberapa sungai besar di Amerika Serikat telah berhasil mengurangi risiko banjir dan meningkatkan kualitas air. Lahan basah yang dipulihkan mampu menahan hingga 30% lebih banyak air dibandingkan tanah biasa, memberikan waktu tambahan bagi air untuk meresap ke tanah dan mengurangi tekanan pada sistem drainase (Rani and Kumar, 2024). Selain itu, vegetasi di sepanjang sungai membantu mengurangi erosi, yang biasanya meningkat selama musim hujan.

2.7.4 Infrastruktur Fleksibel dan Adaptif

Selain solusi berbasis alam, infrastruktur teknik sungai juga perlu didesain agar lebih fleksibel dan adaptif terhadap kondisi iklim yang berubah. Bendungan dan tanggul yang dibangun saat ini harus mempertimbangkan proyeksi curah hujan di masa depan, yang mungkin lebih tinggi dari yang terjadi saat ini. Sistem pemantauan dan peringatan dini yang menggunakan teknologi real-time juga sangat penting untuk memprediksi risiko banjir dan memberikan respons yang cepat (Popescu *et al.*, 2024).

Pentingnya penggunaan teknologi pemantauan otomatis dalam infrastruktur bendungan dan tanggul. Dengan data real-time tentang ketinggian air, curah hujan, dan kecepatan aliran sungai, operator bendungan dapat mengelola pelepasan air dengan lebih efisien untuk mencegah kerusakan pada infrastruktur dan masyarakat yang tinggal di hilir Sungai (Postel and Richter, 2012).

Pendekatan ini tidak hanya membantu mengurangi risiko banjir tetapi juga meminimalkan dampak negatif terhadap ekosistem sungai yang rentan.

2.7.5 Konservasi Air dan Pengelolaan Sumber Daya

Pengelolaan air yang efisien juga menjadi bagian penting dari adaptasi terhadap perubahan iklim. Di banyak negara, peningkatan frekuensi kekeringan akibat perubahan iklim menuntut penggunaan air yang lebih bijaksana dan pengelolaan sumber daya air yang lebih berkelanjutan. Teknik irigasi yang lebih hemat air, sistem pengelolaan air hujan, dan teknologi daur ulang air adalah beberapa pendekatan yang dapat digunakan untuk mengurangi tekanan pada sungai dan memastikan pasokan air yang cukup di masa mendatang.

Wilayah yang rentan terhadap kekeringan, pengelolaan air berbasis DAS (Daerah Aliran Sungai) telah terbukti efektif dalam mengoptimalkan penggunaan air dan menjaga keseimbangan ekosistem sungai. Sistem irigasi yang cerdas, misalnya, dapat mengurangi pemborosan air hingga 20%, membantu menjaga aliran sungai yang stabil selama musim kering (Jekel, 2005).

DAFTAR PUSTAKA

- Asdak, C. (2023) *Hidrologi dan pengelolaan daerah aliran sungai*. UGM PRESS.
- Asima, H. *et al.* (2022) 'Comparison of vegetation types for prevention of erosion and shallow slope failure on steep slopes in the southeastern USA', *Land*, 11(10), p. 1739.
- Bolognesi, T., Pinto, F. S. and Farrelly, M. (2023) *Routledge handbook of urban water governance*. Routledge.
- Bolyard, J. A. J. (2024) 'Effects of Low-Cost, Low-Tech Tools for Riparian Restoration on Prairie Streams in Western South Dakota'.
- Fairuzzen, M. R. *et al.* (2024) 'Peran Tata Ruang dalam Mitigasi Risiko Pembangunan dan Pencegahan Bencana Alam', *Interdisciplinary Explorations in Research Journal*, 2(3), pp. 1497–1516.
- Fertel, J. A. (2021) *Eco-geomorphic flows: Modification of wet-season dam operations to support downstream salmonid habitat*. University of California, Davis.
- Gaskin, S., Lacey, J. and MacVicar, B. (no date) 'RIVER FLOW 2022'.
- Gong, C. *et al.* (2024) 'Herbaceous Vegetation in Slope Stabilization: A Comparative Review of Mechanisms, Advantages, and Practical Applications', *Sustainability*, 16(17), p. 7620.
- Hill, R. J. (2024) 'From Human Threats to Human Solutions: Impacts of Freshwater Runoff Pollution on Rocky Shores and a New Approach to Training Environmental Problem Solvers'. University of California, Irvine.
- Jekel, H. (2005) 'Sustainable water management in Europe—the water framework directive', in *Transboundary Water Resources: Strategies for Regional Security and Ecological Stability: Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Transboundary Water Resources: Strategies for Regional Security and Ecological Stability Novosibirsk, Russia 25*. Springer, pp. 121–127.
- de Jesús Arce-Mojica, T. *et al.* (2019) 'Nature-based solutions (NbS) for reducing the risk of shallow landslides: Where do we stand?', *International journal of disaster risk reduction*, 41, p.

101293.

- Manakane, S. E., Rakuasa, H. and Latue, P. C. (2023) 'Pemanfaatan Teknologi Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografis untuk Identifikasi Perubahan Tutupan Lahan di DAS Marikurubu, Kota Ternate', *Tabela Jurnal Pertanian Berkelanjutan*, 1(2), pp. 51–60.
- Mannucci, S. (2024) 'Climate Change Adaptation for the Built Environment: Addressing Urban Flood', in *Climate Adaptation in Urban Planning: Toward Sustainable and Resilient Urban Environments*. Springer, pp. 29–54.
- Mira, E. *et al.* (2022) 'The conservation and restoration of riparian forests along Caribbean riverbanks using legume trees', *Sustainability*, 14(7), p. 3709.
- Muktiali, M. (2018) 'Pemberdayaan/Partisipasi Masyarakat Dalam Restorasi Sungai Di Das Hulu Bengawan Solo Kabupaten Wonogiri', in. *Prosiding Seminar Nasional Geografi UMS IX 2018*.
- Murgatroyd, A. and Dadson, S. (2019) 'Natural flood risk management'.
- Mutiani, M. *et al.* (2024) 'Strategi Pemanfaatan Bantaran Sungai untuk Pengembangan Masyarakat Berkelanjutan: Sebuah Analisis Sistematis', *Nusantara Community Empowerment Review*, 2(1), pp. 1–8.
- Ngo, H. Q. (2022) *Development of an efficient modelling approach to support economically and socially acceptable flood risk reduction in Coastal Cities: Can Tho City, Mekong Delta, Vietnam*. CRC Press.
- O'Hogain, S. *et al.* (2018) 'Nature-based solutions', *A Technology Portfolio of Nature Based Solutions: Innovations in Water Management*, pp. 1–9.
- Opperman, J. J. and Galloway, G. E. (2022) 'Nature-based solutions for managing rising flood risk and delivering multiple benefits', *One Earth*, 5(5), pp. 461–465.
- Phillips, C. and Marden, M. (2005) 'Reforestation schemes to manage regional landslide risk', *Landslide hazard and risk*, pp. 517–547.

- Popescu, I. I. *et al.* (2024) 'Evaluating the Sustainability of Longtime Operating Infrastructure for Romanian Flood Risk Protection'.
- Postel, S. and Richter, B. (2012) *Rivers for life: managing water for people and nature*. Island press.
- Rahmadhani, R. (no date) 'Strategi dan Program Pencegahan Banjir di Indonesia'.
- Rane, N., Choudhary, S. and Rane, J. (2023) 'Leading-edge Artificial Intelligence (AI), Machine Learning (ML), Blockchain, and Internet of Things (IoT) technologies for enhanced wastewater treatment systems', *Machine Learning (ML), Blockchain, and Internet of Things (IoT) technologies for enhanced wastewater treatment systems (October 31, 2023)*.
- Rani, K. and Kumar, A. (2024) 'Biotechnological Innovations in Urban Forestry: Adapting and Mitigating Climate Change and Environmental Pollution', in *Urban Forests, Climate Change and Environmental Pollution*. Springer, pp. 573–591.
- Suprayogi, S., Purnama, L. S. and Darmanto, D. (2024) *Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*. UGM PRESS.
- Tullos, D. *et al.* (2021) 'Enhancing resilience of river restoration design in systems undergoing change', *Journal of Hydraulic Engineering*, 147(3), p. 3121001.
- Waskitho, N. T. (2024) *PENGELOLAAN DAERAH ALIRAN SUNGAI DI INDONESIA*. UMMPress.

BAB 3

KETAHANAN DALAM TEKNIK SUNGAI

Oleh Azizah Rokhmawati

3.1 Pendahuluan

Sebagai negara kepulauan dengan kekayaan alam yang besar, Indonesia memiliki banyak sungai yang dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan. Namun, kualitas air sungai di Indonesia saat ini mengalami penurunan yang signifikan akibat faktor-faktor seperti kegiatan industri dan perubahan pola hidup masyarakat. Pencemaran yang sudah meluas di berbagai sungai di Indonesia berdampak negatif dan memerlukan tindakan penanganan yang tepat dari seluruh lapisan masyarakat. Dampak buruk ini juga berpengaruh pada sektor industri, khususnya pertanian. Melihat kondisi tersebut diperlukan sebuah upaya untuk ketahanan sungai dalam memperbaiki kondisi sungai yang saat ini telah banyak mengalami pencemaran dan kerusakan karena faktor kondisi sungai itu sendiri maupun faktor yang datang dari luar sungai, seperti pencemaran dan penurunan kualitas air (Fenia, 2023).

Kondisi sungai di Indonesia terkait ketahanan dalam teknik sungai menghadapi permasalahan cukup serius yang berhubungan dengan pencemaran dan kualitas air. Permasalahan ini juga dihadapi sebagian besar ekosistem perairan. Dari hasil pemantauan di lapangan, sekitar 59% sungai di Indonesia mengalami pencemaran yang signifikan, dengan kondisi 46% di antaranya tercemar berat (Taufani, 2024). Pencemaran sungai mencerminkan dampak dari aktivitas industri, limbah domestik, dan penggunaan pestisida serta pupuk kimia yang berlebihan dalam pertanian.

Secara umum kondisi yang terjadi di sungai Indonesia terkait kualitas air, pencemaran mikroplastik serta pengaruhnya terhadap dampak kesehatan masyarakat dijabarkan dalam penjelasan dibawah ini:

Terkait Kualitas Air, 19% dari sungai-sungai di Indonesia yang masih dalam kondisi baik, sementara 67% tercemar ringan dan

13% tercemar sedang (Riani, 2024). Berbagai upaya telah dilakukan untuk menanggulangi pencemaran ini, baik secara teknis maupun non teknis dengan harapan kondisi sungai tersebut akan kembali pulih dan berfungsi sebagaimana mestinya. Upaya maksimal akan mengembalikan kondisi sungai, sebagai contoh adalah sungai Citarum, Jawa Barat yang pernah mendapat predikat sungai tercemar di dunia dengan kategori cemar berat. Berbagai upaya dilakukan untuk pemulihan sungai dengan program “Giat Citarum Harum” yang dilakukan pemerintah setempat, saat ini kondisi Sungai Citarum berada pada kategori cemar ringan. Upaya perbaikan terus dilakukan dan target yang diharapkan adalah pada tahun 2025 kualitas air Sungai Citarum layak untuk dikonsumsi (Soraya & Aminah, 2022).

Permasalahan yang perlu mendapat perhatian terkait ketahanan sungai yang tidak kalah serius adalah masalah pencemaran mikroplastik, yakni pencemaran yang terjadi di sungai yang disebabkan oleh potongan/ partikel plastik atau fiber yang sangat kecil, dengan ukuran diameter kurang dari 5 mm dan dapat mencemari lingkungan. Penelitian menunjukkan bahwa semua air sungai di DAS Barito tercemar mikroplastik, dengan rata-rata 56 partikel mikroplastik per 100-liter air (Nuswantoro, 2024). Pencemaran yang disebabkan oleh mikroplastik ini dapat mengancam kesehatan ekosistem dan manusia.

Pencemaran yang terjadi di sungai berdampak pada kesehatan masyarakat yang tinggal di sekitar wilayah perairan. Kondisi ini terjadi di beberapa wilayah sungai di Indonesia. Studi kasus terjadi di daerah sekitar Sungai Citarum, ada penurunan populasi ikan hingga lebih dari 60% akibat kerusakan ekosistem. Kondisi ini menyebabkan masyarakat yang tinggal di sepanjang aliran sungai yang mengambil ikan untuk dikonsumsi sehari-hari rawan terhadap berbagai penyakit.

Berbagai kondisi sungai di Indonesia yang disebutkan diatas, maka diperlukan upaya meningkatkan ketahanan sumberdaya air dengan beberapa langkah strategis yang dapat dilakukan antara lain:

1. Pengelolaan sungai secara terpadu, pendekatan pengelolaan semua sumber daya air di daerah aliran sungai termasuk

- bangunan sungai utama maupun bangunan tambahan. Pengelolaan meliputi debit, saluran sungai, bangunan pengendali sungai ketersediaan air dan sempadan sungai.
2. Perbaikan Ekosistem Sungai. Program ini dikenal dengan nama restorasi sungai yang berfungsi untuk memulihkan kualitas air dan habitat alami di sepanjang sungai.
 3. Edukasi kepada Masyarakat. Program ini memberikan Pendidikan dan wawasan kepada masyarakat untuk ikut memiliki dan menjaga wilayah sungai terkait kebersihan dan tidak membuang sampah ke sungai. Meningkatkan kesadaran masyarakat mengenai pentingnya menjaga kebersihan sungai dan dampak dari pencemaran.
 4. Perlu Kerjasama berbagai pihak antara *stake holder*, masyarakat dan sektor swasta dalam mengatasi permasalahan yang ada di wilayah sungai. Pengelolaan yang dilakukan antar berbagai pemangku kepentingan ini bertujuan agar perbaikan wilayah sungai dapat dilakukan secara terpadu dan berkelanjutan.

3.1.1 Pencemaran dan Kualitas Air Sungai

Pencemaran yang terjadi menyebabkan penurunan kualitas air sungai, beberapa penyebab pencemaran air sungai seperti disebutkan dibawah ini:

1. Pencemaran Akibat Aktifitas Industri

Salah satu penyebab utama buruknya kualitas air sungai di Indonesia adalah pencemaran yang disebabkan oleh limbah industri. Banyak perusahaan yang tidak mengelola limbahnya dengan efektif, sehingga limbah berbahaya seperti logam berat, bahan kimia, dan zat beracun lainnya mengalir ke dalam sungai. Ketika limbah-limbah tersebut dibuang sembarangan, mereka akan cepat menyebar dan memengaruhi kondisi air sungai. Akibatnya, air yang sudah tercemar tersebut menjadi tidak layak untuk konsumsi dan pemakaian sehari-hari.

2. Penggunaan Bahan kimia

Penggunaan pestisida dan pupuk kimia secara berlebihan dalam pertanian modern dapat menyebabkan polusi air, dimana sisa-sisa zat kimia tersebut terbawa oleh air hujan dan

merusak ekosistem sungai. Sisa-sisa bahan kimia ini seringkali terbawa oleh aliran air hujan ke dalam sistem perairan, yang pada akhirnya dapat merusak ekosistem sungai. Akumulasi zat-zat berbahaya ini tidak hanya mempengaruhi kualitas air, tetapi juga mengancam kehidupan organisme akuatik dan mengganggu keseimbangan ekosistem, sehingga berdampak negatif pada kesehatan lingkungan dan masyarakat yang bergantung pada sumber daya air tersebut.

3. Limbah Plastik

Limbah plastik yang masuk ke sungai menjadi masalah serius yang berkontribusi terhadap penurunan kualitas air. Ketika plastik dibuang sembarangan, baik dari aktivitas rumah tangga, industri, maupun perdagangan, sisa-sisa plastik ini dapat terbawa oleh aliran air hujan ke dalam sungai. Proses ini menyebabkan penumpukan sampah plastik di sepanjang aliran sungai, yang berdampak pada ekosistem perairan.

4. Perubahan Penggunaan Lahan

Transformasi tata guna lahan, seperti pembangunan permukiman atau area industri, dapat mengubah aliran air dan memicu erosi tanah. Sedimen dan bahan organik yang terbawa oleh erosi ini dapat mencemari sungai dan mempengaruhi kualitas air.

3.1.2 Dampak Pencemaran dan Kualitas Air Sungai

Penyebab pencemaran air yang telah disebutkan diatas, tentu saja sangat berdampak besar pada kondisi air daerah sungai terutama pada kualitas air sungai. Dampak buruk yang akan terjadi jika kondisi ini terus berlangsung dalam jangka panjang, yakni

1. Membahayakan Kesehatan Masyarakat

Air sungai yang tercemar dapat membahayakan kesehatan masyarakat yang mengandalkan air sungai sebagai sumber air minum. Zat-zat berbahaya dalam air dapat menyebabkan berbagai penyakit, seperti gangguan perut, infeksi, dan bahkan penyakit kronis.

2. Kerusakan Ekosistem

Kehidupan flora dan fauna perairan sangat terpengaruh oleh kualitas air yang memburuk. Polusi dapat mengurangi populasi

ikan, mengganggu keseimbangan ekosistem sungai, hingga memicu hilangnya beberapa jenis ikan bahkan beberapa spesies terancam punah.

3. Sektor Ekonomi terganggu

Kerusakan kualitas air sungai dapat mengganggu sektor ekonomi, seperti perikanan dan pariwisata, yang bergantung pada ekosistem perairan. Produktivitas pertanian juga bisa terpengaruh akibat irigasi dari air sungai yang tercemar.

3.1.3 Upaya Penanggulangan Pencemaran dan Kualitas Air Sungai

Air sungai yang tercemar tidak lagi aman untuk diminum, sehingga diperlukan langkah-langkah konkret untuk mencegah dan meminimalkan pencemaran air sungai. Langkah ini melibatkan pengelolaan limbah yang baik, pengurangan penggunaan bahan kimia berbahaya, serta edukasi masyarakat tentang pentingnya menjaga kebersihan sungai. Berikut beberapa upaya yang bisa dilakukan, antaralain:

1. Memperbaiki Pengelolaan Limbah

Pengelolaan limbah industri perlu ditingkatkan oleh pemerintah dan pihak industri. Penerapan sistem pemurnian limbah yang canggih serta mengadopsi teknologi ramah lingkungan yang mendukung keberlanjutan dapat mengurangi risiko pencemaran lingkungan. Apabila hal ini dilakukan maka limbah yang dihasilkan dari industri tidak dibuang ke sungai karena telah dikelola dengan baik sehingga pencemaran sungai tidak terjadi.

2. Pengelolaan Sampah Plastik.

Pengelolaan sampah yang efektif sangat penting untuk mencegah sampah plastik masuk ke sungai, yang merupakan salah satu sumber pencemaran lingkungan terbesar. Sampah plastik yang dibuang sembarangan dapat terbawa aliran air dan mengendap di sungai, dan pada akhirnya mengalir ke laut. Sampah plastik di sungai dapat menghambat aliran air, merusak ekosistem perairan, serta membahayakan kehidupan akuatik seperti ikan dan organisme lainnya.



Gambar 3.1. Sampah plastik yang menumpuk di sungai
(Sumber: theconversation.com, 2022)

Untuk mengatasi hal ini, program pengelolaan sampah yang komprehensif harus melibatkan beberapa aspek, antara lain:

- a. Peningkatan Infrastruktur Pengelolaan Sampah: Membangun fasilitas pengumpulan sampah yang memadai di sepanjang sungai dan di daerah-daerah pemukiman yang dekat dengan sungai. Tempat sampah yang cukup akan mengurangi potensi pembuangan sampah langsung ke sungai.
- b. Edukasi dan Kesadaran Masyarakat: Kampanye yang mengedukasi masyarakat tentang dampak negatif sampah plastik terhadap lingkungan, terutama di sungai. Ini termasuk memberikan pengetahuan tentang pentingnya memilah sampah dan menggunakan produk yang ramah lingkungan.
- c. Kolaborasi dengan Pihak Terkait: Pemerintah, LSM, dan masyarakat harus bekerja sama dalam merancang dan melaksanakan program pengelolaan sampah. Misalnya, menerapkan sistem daur ulang, membangun fasilitas pengelolaan sampah terpadu, serta menggalakkan gerakan pembersihan sungai secara berkala.
- d. Penerapan Kebijakan Pengurangan Penggunaan Plastik: Mengurangi ketergantungan pada plastik sekali pakai dengan kebijakan yang mendukung penggunaan

alternatif yang lebih ramah lingkungan, seperti kantong belanja kain atau bahan organik.

3. Penegakan Hukum Yang Tegas

Pemantauan kualitas air sungai yang efektif dan penegakan hukum yang tegas sangat diperlukan untuk menjaga kelestarian lingkungan dan mencegah kerusakan lebih lanjut akibat pencemaran. Pemerintah memiliki peran penting dalam memastikan bahwa kebijakan terkait pengelolaan kualitas air sungai dilaksanakan dengan baik. Beberapa kebijakan dan langkah yang dapat diambil oleh pemerintah terkait pemantauan kualitas air sungai adalah sebagai berikut:

- a. Pembangunan Sistem Pemantauan Kualitas Air yang Terintegrasi: Pemerintah perlu mengembangkan sistem pemantauan yang mencakup pengujian kualitas air secara rutin di berbagai titik sepanjang sungai, baik di wilayah perkotaan maupun pedesaan. Data kualitas air ini bisa digunakan untuk memantau perubahan kualitas dan untuk menentukan langkah-langkah mitigasi yang tepat.

Penanggulangan pencemaran air sungai dapat dilakukan melalui pendekatan non-teknis dan teknis; pendekatan non-teknis mencakup usaha untuk mengurangi pencemaran dengan merumuskan regulasi yang bertujuan untuk merencanakan, mengatur, dan memantau semua kegiatan industri serta teknologi agar tidak menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan.



Gambar 3.2. Pemantauan Kualitas Air Sungai
(Sumber: dlh.probolinggakab.go.id, 2022)

- b. Implementasi Teknologi Pemantauan: Pemanfaatan teknologi seperti sensor digital dan stasiun pemantauan otomatis dapat meningkatkan kecepatan dan akurasi dalam mendeteksi pencemaran. Dengan teknologi ini, pemerintah dan lembaga terkait bisa memonitor kualitas air sungai secara real-time dan mengidentifikasi sumber pencemaran lebih cepat.
- c. Penyusunan Standar Kualitas Air yang Ketat: Pemerintah perlu menetapkan dan menegakkan standar kualitas air yang ketat, termasuk ambang batas maksimum untuk kontaminan seperti logam berat, bahan kimia berbahaya, serta sampah organik dan plastik. Hal ini akan menjadi pedoman dalam melakukan pemantauan serta penegakan hukum terhadap pelanggaran yang terjadi.
- d. Pengawasan terhadap Industri dan Aktivitas Pencemar: Industri yang beroperasi di sekitar sungai harus diwajibkan untuk mematuhi aturan pengelolaan limbah dan mengolah air limbah mereka dengan baik. Pemerintah dapat melakukan inspeksi rutin terhadap pabrik-pabrik dan aktivitas lainnya yang berpotensi mencemari sungai untuk memastikan bahwa mereka tidak mencemari badan air.
- e. Sanksi dan Penegakan Hukum yang Tegas: Penerapan sanksi yang tegas bagi pihak-pihak yang melanggar peraturan pengelolaan air akan menciptakan efek jera. Pemerintah perlu meningkatkan penegakan hukum dengan memberikan denda yang tinggi atau bahkan hukuman pidana bagi pelanggar yang secara sengaja mencemari sungai, serta memperketat izin-izin usaha yang berpotensi menambah beban pencemaran.

Dengan kebijakan yang mendukung pemantauan kualitas air sungai dan penegakan hukum yang lebih ketat, diharapkan kualitas air sungai dapat terjaga dengan baik dan upaya pencemaran dapat diminimalisir. Hal ini akan berdampak positif pada kesehatan ekosistem sungai dan masyarakat yang bergantung padanya.

3.2 Ketahanan Dalam Teknik Sungai

Keberadaan air sebagai elemen esensial untuk kehidupan sangat penting. Dalam berbagai studi, ketahanan air ditemukan memiliki peran signifikan dalam memperkuat ketahanan ekologi di tingkat regional, karena sumber daya air melintasi batas-batas negara (Veettil & Mishra, 2018; Sen & Kansal, 2019; Chawla et al., 2020). Konsep Ketahanan air sendiri berkembang secara dinamis seiring dengan kebutuhan para pemangku kepentingan terkait yang mencakup masalah pasokan air, kelangkaan, pengelolaan, risiko banjir, serta isu-isu yang menyentuh keamanan nasional (Damkjaer and Taylor, 2017; Howlett and Cuenca, 2017).

Pengertian ketahanan dalam teknik sungai adalah dari kata dasar daya tahan/berdaya tahan (*resilience/resilient*) adalah kapasitas sebuah sistem sungai dalam bertahan dari semua potensi yang datang dari luar yang menyebabkan kondisi sungai tersebut terganggu atau berpotensi menimbulkan bencana. Dalam pengertian lain yakni kondisi sungai untuk beradaptasi dengan cara bertahan atau berubah sedemikian rupa dengan berbagai upaya agar kondisi sungai tetap terjaga dengan segala ekosistem dan kehidupan di dalamnya.

Ketahanan dalam konteks teknik sungai merujuk pada kemampuan sistem sungai dan masyarakat yang bergantung padanya untuk beradaptasi dan bertahan terhadap berbagai tantangan, baik dari faktor alam maupun buatan manusia. Hal ini mencakup beberapa aspek penting:

3.2.1 Ketahanan Sumber Daya Air

Ketahanan air merupakan komponen utama dalam teknik sungai, yang melibatkan kemampuan untuk memenuhi kebutuhan air secara berkelanjutan. Ini mencakup pengelolaan sumber daya air untuk irigasi, konsumsi, dan pengendalian banjir. Ketahanan air juga melibatkan pemantauan kualitas air dan penanganan dampak perubahan iklim serta bencana alam (Hatmoko et al., 2018).

Ketahanan sumber daya air di daerah sungai merupakan aspek krusial dalam pengelolaan air yang berkelanjutan, terutama dalam konteks perubahan iklim dan peningkatan kebutuhan air.

Beberapa elemen penting terkait ketahanan sumber daya air di daerah sungai meliputi:

1. Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS).

Pengelolaan DAS yang efektif sangat penting untuk menjaga ketersediaan dan kualitas air. Ini mencakup rehabilitasi lahan, perlindungan daerah resapan air, dan pengendalian pencemaran. Dengan menjaga kesehatan ekosistem DAS, seperti hutan dan lahan basah, dapat meningkatkan kapasitas penyerapan air dan mengurangi risiko banjir serta kekeringan (PuskoMedia Indonesia, 2024).

2. Infrastruktur Penyimpanan Air.

Pembangunan infrastruktur seperti waduk, embung, dan situ sangat penting untuk menyimpan air selama musim hujan agar dapat digunakan pada musim kemarau. Di Indonesia, meskipun memiliki potensi air yang besar, kapasitas penyimpanan yang ada masih rendah. Oleh karena itu, perluasan dan pemeliharaan infrastruktur ini sangat diperlukan untuk meningkatkan ketahanan sumber daya air (Kementerian PUPR, 2012; Subagiyo, 2021).

3. Konservasi Air.

Strategi konservasi air harus diterapkan di semua sektor, termasuk pertanian, industri, dan domestik. Praktik irigasi yang efisien dan penggunaan teknologi hemat air dapat membantu mengurangi pemborosan dan memastikan ketersediaan air yang cukup bagi semua pengguna (Valiant, 2015).

4. Pemantauan Kualitas Air.

Pemantauan kualitas air secara rutin di sungai-sungai penting untuk mendeteksi pencemaran dan mengidentifikasi sumber-sumber masalah. Dengan data yang akurat, langkah-langkah mitigasi dapat dilakukan untuk menjaga kualitas air tetap baik (Sekretariat Dewan Sumber Daya Air Nasional, 2023).

5. Adaptasi terhadap Perubahan Iklim.

Perubahan iklim mempengaruhi pola curah hujan dan ketersediaan air. Oleh karena itu, strategi adaptasi seperti pembangunan infrastruktur yang tahan terhadap perubahan iklim dan pengembangan sistem peringatan dini untuk

bencana terkait air sangat penting untuk meningkatkan ketahanan sumber daya air (Yayasan Konservasi Alam Nusantara, 2024).

6. Kolaborasi Multi-Pihak.

Pengelolaan sumber daya air harus melibatkan berbagai pihak, termasuk pemerintah, masyarakat lokal, dan sektor swasta. Kerjasama ini diperlukan untuk merumuskan kebijakan yang komprehensif dan implementasi program-program yang efektif dalam pengelolaan sumber daya air di daerah sungai.

Dengan pendekatan yang holistik dan berkelanjutan dalam pengelolaan sumber daya air di daerah sungai, ketahanan terhadap bencana serta ketersediaan air untuk kebutuhan masyarakat dapat terjamin.

3.2.2 Ketahanan Masyarakat Tepian Sungai

Ketahanan masyarakat daerah tepian sungai mengacu pada kemampuan mereka untuk bertahan dan beradaptasi terhadap perubahan kondisi lingkungan seperti banjir dan polusi. Penelitian telah menunjukkan bahwa faktor sosial dan ekonomi sangat memengaruhi ketahanan suatu masyarakat. Di daerah rawan bencana, hubungan antar penduduk dan sumber pendapatan yang stabil merupakan kunci untuk mempertahankan penghidupan (Sumber: Maulika et al., 2021).

Akibat kurang perhatian pemerintah dalam mengelola wilayah tepian sungai, masyarakat tepian sungai menjadi terlantar dan berubah menjadi daerah marginal dengan berbagai permasalahan. Permukiman di tepi sungai sering menghadapi masalah seperti tingginya kepadatan bangunan di daerah tepi sungai, yang menyebabkan terbentuknya permukiman kumuh. (Sumber: Perkim.id, 2017)



Gambar 3.3. Kondisi Perumahan Tepian Sungai
(Sumber: Perkim.id, 2017)

Faktor-faktor yang mempengaruhi ketahanan masyarakat daerah tepi sungai meliputi:

1. Aspek Sosial

a. Kekerabatan:

Persaudaraan yang terjalin di antara masyarakat yang bermukim di wilayah bantaran sungai menandakan adanya ikatan sosial yang kuat. Hubungan dekat antar warga memungkinkan adanya dukungan sosial di saat krisis. Misalnya, jika terjadi banjir, warga dapat saling membantu melakukan evakuasi dan menyediakan perlengkapan yang dibutuhkan.

b. Partisipasi Masyarakat:

Tingkat partisipasi masyarakat dalam kegiatan sosial dan pengambilan keputusan juga berperan. Keterlibatan dalam organisasi lokal dapat meningkatkan kesadaran akan risiko bencana dan memungkinkan tanggapan yang lebih cepat dan terkoordinasi.

c. Hubungan Kekerabatan:

Persaudaraan yang terjalin antar masyarakat yang tinggal di daerah tepi sungai memiliki ikatan sosial yang kuat. Hubungan antarwarga yang erat memungkinkan adanya

dukungan sosial dalam menghadapi krisis. Misalnya, saat terjadi banjir, warga dapat saling membantu dalam evakuasi dan penyediaan kebutuhan dasar.

2. Aspek Ekonomi

a. Sumber pendapatan:

Masyarakat daerah tepi sungai sering kali bergantung pada sumber daya alam seperti perikanan dan pertanian. Perekonomian yang stabil juga meningkatkan kemampuan beradaptasi terhadap perubahan lingkungan. Misalnya, diversifikasi sumber pendapatan dapat mengurangi ketergantungan pada pekerjaan yang rentan terhadap bencana.

b. Akses terhadap sumber daya:

Akses mudah terhadap sumber daya seperti air bersih dan makanan juga berdampak pada ketahanan. Masyarakat dengan akses yang lebih baik cenderung lebih mampu bertahan di masa krisis. (Rahmayana L 2019)

3. Aspek Lingkungan

a. Kondisi Fisik Lingkungan: Permukiman di tepi sungai sering kali berada di daerah rawan banjir. Ketahanan masyarakat dipengaruhi oleh infrastruktur yang ada, seperti tanggul dan sistem drainase yang efektif. Infrastruktur yang baik dapat mengurangi dampak bencana.

b. Pengetahuan Lokal: Pengetahuan tradisional mengenai pola cuaca dan perilaku sungai sangat berharga dalam merencanakan tindakan mitigasi. Masyarakat yang memahami lingkungan mereka cenderung lebih siap menghadapi bencana. (Sumber, Ariviyanti, 2014)

4. Aspek Pendidikan dan Kesadaran.

Tingkat pendidikan masyarakat juga berperan penting dalam ketahanan. Pendidikan yang baik meningkatkan kesadaran akan risiko bencana dan cara-cara mitigasi, sehingga masyarakat dapat mengambil langkah-langkah preventif.

Meskipun banyak faktor mendukung ketahanan masyarakat di tepi sungai, namun terdapat beberapa tantangan yang dihadapi dalam ketahanan masyarakat tepian sungai, antaralain:

- a. Kemiskinan: Banyak komunitas di tepi sungai hidup dalam kondisi ekonomi yang sulit, sehingga sulit untuk menginvestasikan sumber daya dalam mitigasi bencana.
- b. Kurangnya Infrastruktur di daerah tepian sungai: Beberapa daerah di Indonesia, infrastruktur untuk mengatasi risiko bencana masih kurang memadai.
- c. Perubahan Iklim: Perubahan iklim menyebabkan pola cuaca menjadi tidak menentu, meningkatkan frekuensi dan intensitas bencana alam seperti banjir.

Ketahanan masyarakat di tepi sungai adalah hasil dari interaksi kompleks antara faktor sosial, ekonomi, dan lingkungan. Memperkuat ketahanan ini memerlukan pendekatan holistik yang melibatkan peningkatan pendidikan, pengembangan infrastruktur, serta penguatan hubungan sosial dalam komunitas. Dengan demikian, masyarakat dapat lebih siap menghadapi tantangan yang muncul akibat perubahan lingkungan dan bencana alam. (Rahmayana L 2019)

3.2.3 Ketahanan Infrastruktur Sepanjang Sungai

Infrastruktur yang dibangun di sepanjang sungai, seperti bendungan dan saluran irigasi, harus dirancang untuk tahan terhadap erosi dan perubahan iklim. Ketahanan infrastruktur ini penting untuk memastikan bahwa sistem pengelolaan air dapat berfungsi dengan baik meskipun terjadi perubahan lingkungan yang signifikan (Nurmutia, 2024).

Berikut adalah beberapa aspek yang menjelaskan pentingnya ketahanan infrastruktur sungai:

1. Desain dan Konstruksi yang Tahan Lama.

Infrastruktur seperti bendungan, saluran irigasi, dan tanggul harus dirancang dengan mempertimbangkan kondisi lingkungan yang berubah. Ini mencakup penggunaan bahan bangunan yang tahan terhadap korosi dan erosi, serta teknik konstruksi yang dapat menahan tekanan dari aliran air yang kuat. Misalnya, bendungan harus memiliki fondasi yang kuat

dan sistem drainase yang efektif untuk mencegah kerusakan akibat genangan air.

2. Pengendalian Erosi.

Erosi adalah masalah serius yang dapat mengancam integritas struktur infrastruktur sungai. Oleh karena itu, teknik pengendalian erosi seperti penanaman vegetasi di tepi sungai, penggunaan geotekstil, dan pembangunan struktur pelindung seperti batu riprap sangat penting untuk menjaga stabilitas tanah di sekitar infrastruktur.

3. Adaptasi terhadap Perubahan Iklim.

Perubahan iklim menyebabkan pola curah hujan yang tidak menentu dan peningkatan frekuensi bencana alam seperti banjir. Infrastruktur harus dirancang untuk beradaptasi dengan kondisi ini, termasuk kemampuan untuk menampung volume air yang lebih besar selama periode hujan ekstrem. Proyek pembangunan bendungan baru di Indonesia, misalnya, bertujuan untuk meningkatkan kapasitas tampungan air guna mengurangi risiko banjir dan memastikan ketersediaan air bersih (KEMENPUPR, 2024).

4. Sistem Pemantauan dan Pemeliharaan.

Ketahanan infrastruktur juga bergantung pada pemantauan dan pemeliharaan yang rutin. Sistem pemantauan kualitas air dan kondisi fisik infrastruktur perlu diterapkan untuk mendeteksi masalah sejak dini. Pemeliharaan berkala diperlukan untuk memastikan bahwa semua komponen infrastruktur berfungsi dengan baik dan mampu menghadapi kondisi ekstrem.

5. Kolaborasi Multi-Pihak.

Pembangunan dan pemeliharaan infrastruktur sungai memerlukan kerjasama antara pemerintah, masyarakat lokal, dan sektor swasta. Keterlibatan masyarakat dalam perencanaan dan pengawasan proyek infrastruktur dapat meningkatkan keberlanjutan dan efektivitas program-program tersebut.

6. Peningkatan Kapasitas Infrastruktur.

Dalam beberapa tahun terakhir, pemerintah Indonesia telah berupaya meningkatkan kapasitas infrastruktur sumber daya air melalui pembangunan bendungan baru, jaringan irigasi, dan

sistem pengendalian banjir (SATGAS PPK DAS Citarum, 2019). Dengan menyelesaikan proyek-proyek ini, diharapkan ketahanan infrastruktur dapat meningkat secara signifikan.

Ketahanan infrastruktur di sepanjang sungai merupakan elemen kunci dalam pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan. Dengan desain yang tepat, pengendalian erosi, adaptasi terhadap perubahan iklim, serta pemantauan dan pemeliharaan yang baik, infrastruktur ini dapat berfungsi secara optimal meskipun menghadapi tantangan lingkungan yang signifikan. Upaya kolaboratif antara berbagai pihak juga sangat penting dalam mencapai tujuan ini.

3.2.4 Ketahanan untuk Adaptasi dan Respon Terhadap Bencana

Ketahanan juga mencakup kemampuan untuk merespons bencana secara efektif. Ini melibatkan pengorganisasian diri masyarakat dan pembelajaran dari pengalaman masa lalu untuk meningkatkan kapasitas menghadapi risiko di masa depan (Nurwahyudi, 2018).

Ketahanan sungai terhadap bencana sangat penting dalam konteks adaptasi dan respons masyarakat terhadap berbagai risiko yang dihadapi. Ketahanan ini mencakup kemampuan untuk merespons bencana secara efektif, serta pengorganisasian diri masyarakat berdasarkan pengalaman masa lalu untuk meningkatkan kapasitas mereka dalam menghadapi risiko di masa depan.

Beberapa hal yang berkaitan dengan ketahanan untuk adaptasi dan respon terhadap bencana antara lain:

1. Pengorganisasian Masyarakat.

Masyarakat di tepi sungai sering kali membentuk kelompok atau komunitas yang fokus pada mitigasi risiko bencana. Mereka berkolaborasi untuk menyusun rencana evakuasi, melakukan simulasi bencana, dan berbagi informasi tentang potensi ancaman seperti banjir. Misalnya, di beberapa daerah, masyarakat telah mengembangkan sistem peringatan dini yang melibatkan komunikasi antarwarga untuk memberi tahu satu

sama lain tentang perubahan cuaca atau kondisi sungai yang berpotensi berbahaya.

2. Pembelajaran dari Pengalaman Masa Lalu.

Pengalaman masa lalu dalam menghadapi bencana, seperti banjir atau pencemaran, memberikan pelajaran berharga bagi masyarakat. Dengan menganalisis penyebab dan dampak dari bencana sebelumnya, mereka dapat merumuskan strategi yang lebih baik untuk mitigasi. Contohnya, jika suatu komunitas mengalami kerugian akibat banjir karena kurangnya infrastruktur drainase, mereka dapat bekerja sama dengan pemerintah untuk membangun saluran drainase yang lebih efisien. (Sumber; Lid Itsna Adkhi et al, 2022)

3. Kapasitas Adaptasi Masyarakat.

Ketahanan sungai juga mencakup kapasitas adaptasi masyarakat terhadap perubahan lingkungan. Ini termasuk pengembangan infrastruktur yang tahan bencana, seperti pembangunan tanggul dan saluran irigasi yang dirancang untuk menahan aliran air yang ekstrem. Masyarakat juga dapat mengadopsi praktik pertanian yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan untuk mengurangi dampak pencemaran dan kerusakan ekosistem. (Sumber: Risna K et al, 2023)

4. Mitigasi Risiko

Masyarakat di tepi sungai sering kali melibatkan diri dalam kegiatan mitigasi risiko, seperti reboisasi di sekitar daerah aliran sungai untuk mencegah erosi dan meningkatkan kualitas air. Mereka juga dapat berpartisipasi dalam program-program pemerintah yang bertujuan untuk memperbaiki kondisi lingkungan dan membangun infrastruktur yang lebih baik.

5. Kerjasama dengan Pihak Berwenang.

Kerjasama antara masyarakat dan pemerintah sangat penting dalam meningkatkan ketahanan sungai terhadap bencana. Pemerintah dapat memberikan dukungan teknis dan sumber daya untuk membantu masyarakat dalam mengimplementasikan rencana mitigasi dan adaptasi. Dalam banyak kasus, program pelatihan dan pendidikan bagi masyarakat tentang cara menghadapi bencana juga sangat membantu.

Ketahanan sungai terhadap bencana melibatkan pengorganisasian masyarakat, pembelajaran dari pengalaman masa lalu, kapasitas adaptasi, mitigasi risiko, dan kerjasama dengan pihak berwenang. Dengan pendekatan ini, masyarakat dapat meningkatkan kemampuan mereka untuk merespons bencana secara efektif dan meminimalkan dampak negatif yang ditimbulkan oleh perubahan lingkungan dan risiko bencana di sepanjang sungai.

3.3 Masyarakat Tepi Sungai Beradaptasi dengan Resiko Bencana

Masyarakat di tepi sungai menghadapi berbagai risiko bencana, terutama banjir, yang memerlukan strategi adaptasi yang efektif. Berikut adalah beberapa cara masyarakat beradaptasi dengan risiko bencana:

1. Adaptasi Aktif

Masyarakat melakukan perubahan proaktif untuk menyesuaikan lingkungan mereka. Misalnya, di Dusun Liwek, warga mengubah rutinitas harian mereka dengan membatasi aktivitas di luar rumah pada sore hari ketika debit air sungai cenderung meningkat. Mereka juga mengembangkan rute evakuasi sendiri, seperti menuju masjid atau tempat aman lainnya, untuk meminimalkan risiko saat terjadi bencana (Ajami et al., 2016).

2. Penyesuaian Fisik

Banyak komunitas melakukan modifikasi fisik pada bangunan mereka untuk mengurangi dampak banjir. Contohnya, di Kampung Tubir, penduduk membangun rumah dengan dua lantai, di mana lantai atas digunakan untuk aktivitas sehari-hari saat banjir melanda. Mereka juga membuat tanda-tanda pada bangunan untuk memantau ketinggian air dan mengambil tindakan yang diperlukan, seperti memindahkan barang-barang penting ke tempat yang lebih tinggi (Lempoy et al., 2017).

3. Penggunaan Teknologi dan Media Sosial

Dengan kemajuan teknologi, masyarakat memanfaatkan media sosial dan aplikasi untuk mendapatkan informasi terkini tentang cuaca dan potensi bencana. Grup WhatsApp sering

digunakan sebagai saluran komunikasi untuk berbagi informasi terkait situasi darurat dan peringatan dini (Janah et al., 2024).

4. **Larangan dan Aturan Keamanan.**

Pemerintah setempat seringkali memberlakukan larangan tertentu untuk menjaga keselamatan warga. Contohnya, larangan menyeberang sungai pada jam-jam tertentu ketika arus air berpotensi berbahaya. Kesadaran akan risiko ini membantu masyarakat untuk lebih berhati-hati dan menghindari situasi berbahaya.

5. **Kesiapsiagaan dan Pelatihan.**

Masyarakat juga terlibat dalam pelatihan kesiapsiagaan bencana yang mencakup simulasi evakuasi dan perencanaan tindakan darurat. Ini membantu meningkatkan kesadaran dan kemampuan mereka dalam menghadapi situasi darurat.

6. **Kerjasama Komunitas.**

Solidaritas antarwarga sangat penting dalam menghadapi bencana. Masyarakat saling membantu dalam proses evakuasi dan penyediaan bantuan kepada mereka yang terkena dampak (Faradiba et al., 2020).

Kekuatan sistem kekerabatan di komunitas juga berkontribusi pada ketahanan mereka terhadap bencana. Adaptasi masyarakat di tepi sungai terhadap risiko bencana melibatkan kombinasi strategi aktif dan pasif, modifikasi fisik pada bangunan, serta penggunaan teknologi informasi. Dengan meningkatkan kesadaran dan kerjasama antarwarga, komunitas dapat mengurangi dampak negatif dari bencana dan meningkatkan ketahanan mereka secara keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

- Fenia, R. W. (2023). Kondisi terkini kualitas air sungai di Indonesia: Tantangan dan upaya pemulihannya. Mertani. <https://www.mertani.co.id/post/kondisi-terkini-kualitas-air-sungai-di-indonesia-tantangan-dan-upaya-pemulihannya>
- Taufani, M. R. I. (2024). World Water Forum ke-10 akan tawarkan solusi konkret sungai tercemar. CNBC Indonesia. <https://www.cnbcindonesia.com/research/20240503193921-128-535665/world-water-forum-ke-10-akan-tawarkan-solusi-konret-sungai-tercemar>
- Dlh.probolinggokab.go.id (2020) <https://www.facebook.com/dlh.probolinggokab.go.id/posts/pemantauan-kualitas-air-sungai-di-kabupaten-probolinggodalam-rangka-pemantauan-k/181231966558704/>
- Riani, A. (2024). Kondisi terkini sungai di Indonesia, identifikasi sumber pencemar jadi kunci perbaiki kualitas air. Liputan 6. <https://www.liputan6.com/lifestyle/read/5514705/kondisi-terkini-sungai-di-indonesia-identifikasi-sumber-pencemar-jadi-kunci-perbaiki-kualitas-air>
- Soraya, D. A., & Aminah, A. N. (2022). Air Sungai Citarum ditargetkan layak konsumsi di 2025. Republika. <https://news.republika.co.id/berita/r8vu22384/air-sungai-citarum-ditargetkan-layak-konsumsi-di-2025>
- Nuswantoro. (2024). Sungai hilang asa berbilang. Mongabay. <https://www.mongabay.co.id/2024/03/20/sungai-hilang-asa-berbilang/>
- Hatmoko, Waluyo & Radhika, Radhika & Firmansyah, Rendy & Fathoni, Anthon. (2018). Ketahanan Air Irigasi pada Wilayah Sungai di Indonesia. Jurnal Irigasi. 12. 65. 10.31028/ji.v12.i2.65-76.
- PuskoMedia Indonesia. (2024). Mengamankan sumber daya air: Membangun ketahanan terhadap krisis air. Citalahab. <https://citalahab.desa.id/mengamankan-sumber-daya-air-membangun-ketahanan-terhadap-krisis-air/>

- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR). (2012). Pengelolaan sumber daya air sebagai pilar ketahanan air. <https://sda.pu.go.id>
- Subagiyo, A. (2021). Perubahan iklim dan ketahanan sumber daya air. <http://arissubagiyo.lecture.ub.ac.id/2021/05/perubahan-iklim-dan-ketahanan-sumber-daya-air/>
- Valiant, R (2015). Ketersediaan Sumber Daya Air untuk Ketahanan Pangan, Energi dan Lingkungan Lestari Bekerlanjutan: Potret Daerah Aliran Sungai (DAS) Brantas dalam Lokakarya Nasional Universitas Tribhuana Tungadewi. Malang.
- Sekretariat Dewan Sumber Daya Air Nasional. (2023). Tiga ketahanan perlu perhatian. <https://dsdan.go.id>
- Yayasan Konservasi Alam Nusantara (YKAN). (2024). Solusi berbasis alam untuk pelestarian sumber air. <https://www.ykan.or.id/id/publikasi/artikel/siaran-pers/solusi-berbasis-alam-untuk-pelestarian-sumber-air/>
- Maulika, S. C., Nurhidayati, E., & Chairunnisa, C. (2021). Analisis ketahanan masyarakat di tepi sungai Kapuas (Studi kasus Kelurahan Tambelan Sampit). *JeLAST: Jurnal Teknik Kelautan, PWK, Sipil, dan Tambang*, 8(1).
- Nurwahyudi, R. (2018). Implementasi program desa tangguh bencana aspek lingkungan hidup di Kabupaten Pati (Studi kasus di Desa Babalan Kecamatan Gabus). *Eprints Universitas Diponegoro*.
- Direktorat Jenderal Sumber Daya Air - Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2024). Menatap jauh ketahanan air Indonesia. <https://sda.pu.go.id/balai/bwsbalipenida/berita/berita-sda/68-menatap-jauh-ketahanan-air-indonesia>
- Nurmutia, E. (2024). Proyek-proyek ini jadi 'jejak' kontribusi PUPR terhadap ketahanan air. *CNBC Indonesia*. <https://www.cnbcindonesia.com/news/20240503161344-4-535591/proyek-proyek-ini-jadi-jejak-kontribusi-pupr-terhadap-ketahanan-air>

- SATGAS PPK DAS Citarum. (2019). Pentingnya pembangunan infrastruktur air untuk mewujudkan ketahanan air. <https://citarumharum.jabarprov.go.id/pentingnya-pembangunan-infrastruktur-air-untuk-mewujudkan-ketahanan-air//>
- Janah, F. A., Wulandari Seomarsono, A. A., Alifia, N. H., & Maharani, D. P. (2024). Strategi adaptasi masyarakat Dusun Liwek dalam menghadapi bencana banjir di Desa Gondoruso, Lumajang. *Konferensi Nasional Mitra FISIP Universitas Jember*, 2(1), 97-104.
- Ajami, F. M., Poli, H., & Wuisang, C. E. V. (2016). Adaptasi masyarakat bantaran sungai terhadap bencana banjir di Kelurahan Komo Luar Kota Manado. *Ejournal Spasial Universitas Sam Ratulangi*, 3(3), 75-84.
- Lempoy, J. O., Waani, J. O., & Warouw, F. (2017). Adaptasi permukiman sungai di Kampung Tubir Kota Manado terhadap risiko banjir. *Jurnal Arsitektur Daseng Universitas Sam Ratulangi*, 6(1), 47-58.
- Faradiba, I. Y., Rachmawati, T. A., & Usman, F. (2020). Adaptasi masyarakat terhadap bencana banjir di Kecamatan Trucuk, Kabupaten Bojonegoro. *Planning for Urban Region and Environment Universitas Brawijaya*, 9(3), 51-58.

BAB 4

INTEGRASI JASA EKOSISTEM DALAM TEKNIK SUNGAI

Oleh Farida Gaffar

4.1 Definisi Jasa Ekosistem dalam Konteks Teknik Sungai

Jasa ekosistem adalah manfaat yang diberikan oleh ekosistem alami kepada manusia, baik secara langsung maupun tidak langsung. Dalam konteks teknik sungai, jasa ekosistem mencakup berbagai manfaat ekologis, ekonomi, dan sosial yang dihasilkan dari pengelolaan sungai yang berkelanjutan. Pemahaman tentang jasa ekosistem menjadi dasar dalam merancang strategi pengelolaan sungai untuk mendukung kehidupan manusia dan menjaga fungsi ekologis lingkungan.

Ekosistem sungai memberikan berbagai fungsi dan manfaat yang penting bagi kesejahteraan manusia dan keberlanjutan lingkungan. Jasa ekosistem sungai mencakup berbagai aspek seperti penyediaan air bersih, pengendalian banjir, pemeliharaan kualitas air, dan berbagai manfaat sosial dan ekonomi lainnya. Pemahaman tentang jasa ekosistem sungai sangat penting dalam pengelolaan sungai yang berkelanjutan dan untuk meningkatkan kesejahteraan masyarakat yang berada di sekitar sungai.

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa banyak masyarakat masih memiliki pemahaman yang minim tentang jasa ekosistem sungai, meskipun mereka memiliki pengetahuan yang cukup tinggi tentang manfaat ekosistem secara umum. Hal ini menunjukkan perlunya peningkatan pemahaman sosial dan pendidikan mengenai pentingnya ekosistem sungai dan manfaat yang dihasilkannya.

Dalam konteks teknik sungai, evaluasi ekonomi jasa ekosistem sungai menjadi alat penting untuk mengukur manfaat yang diperoleh dari ekosistem sungai dan untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih baik dalam pengelolaan sungai.

Penilaian ekonomi jasa ekosistem sungai juga dapat meningkatkan kesadaran publik tentang pentingnya pelestarian ekosistem sungai dan mendorong pengambilan kebijakan yang lebih berkelanjutan

Pengertian Jasa Ekosistem

Menurut *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA, 2005), jasa ekosistem adalah manfaat yang diperoleh manusia dari ekosistem alami. Jasa ini meliputi penyediaan sumber daya (seperti air bersih), pengaturan proses lingkungan (seperti pengendalian banjir), dukungan terhadap keberlanjutan ekosistem (seperti siklus nutrisi), dan jasa budaya (seperti rekreasi dan estetika). Sungai sebagai salah satu elemen utama ekosistem air tawar menyediakan berbagai jenis jasa ekosistem yang penting bagi kehidupan manusia dan keseimbangan lingkungan.

Relevansi Jasa Ekosistem dengan Teknik Sungai

Dalam teknik sungai, fokus utama adalah pengelolaan dan pemeliharaan fungsi sungai untuk mendukung berbagai kebutuhan manusia, seperti penyediaan air, pengendalian banjir, navigasi, dan rekreasi. Dengan mengintegrasikan konsep jasa ekosistem, teknik sungai tidak hanya berorientasi pada infrastruktur fisik tetapi juga memperhatikan fungsi ekologis sungai. Hal ini memastikan keberlanjutan lingkungan dan mengurangi dampak negatif dari intervensi manusia terhadap ekosistem.

Jenis-Jenis Jasa Ekosistem dalam Konteks Teknik Sungai

Berikut adalah kategori utama jasa ekosistem (MEA, 2005) yang relevan dengan pengelolaan sungai:

1. Jasa Penyediaan (*Provisioning Services*)

Sungai menyediakan sumber daya penting seperti air tawar, ikan, dan bahan bangunan seperti pasir dan kerikil.

- a. Air bersih:** Sungai menjadi sumber utama air untuk kebutuhan domestik, pertanian, dan industri. Air bersih didefinisikan sebagai air yang bebas dari kontaminasi mikroorganisme, bahan kimia, dan zat radioaktif yang dapat membahayakan kesehatan manusia. Air bersih harus memenuhi standar tertentu yang telah ditetapkan oleh

organisasi internasional seperti WHO dan United Nations International Children's Emergency Fund (UNICEF) untuk memastikan keamanan dan kesehatan konsumen. salah satu kebutuhan dasar manusia yang harus terpenuhi untuk menjaga kesehatan dan kesejahteraan. Pengelolaan sungai dan ekosistem terkait sangat penting dalam memastikan ketersediaan air bersih bagi masyarakat. Jasa penyediaan air bersih merupakan salah satu jasa ekosistem yang memberikan manfaat langsung bagi kehidupan manusia

- b. Ikan dan keanekaragaman hayati:** Habitat sungai mendukung produksi ikan dan spesies lain yang penting untuk konsumsi dan perdagangan. Pengelolaan yang tepat dan berkelanjutan sangat penting untuk menjaga keanekaragaman hayati ikan². Penelitian-penelitian ini menunjukkan bahwa perikanan berlebihan, perdagangan ilegal, dan perubahan penggunaan lahan dapat merusak ekosistem dan mengancam keberlanjutan populasi ikan³. Oleh karena itu, diperlukan upaya kolaboratif antara pemerintah, masyarakat, dan sektor perikanan untuk mengembangkan kebijakan dan praktik yang dapat menjaga keanekaragaman hayati di perairan Indonesia.

2. Jasa Pengaturan (*Regulating Services*)

Sungai memainkan peran penting dalam mengatur proses lingkungan:

- a. Pengendalian banjir:** Banjir merupakan salah satu bencana alam yang sering terjadi di seluruh dunia dan menyebabkan kerugian ekonomi, rusaknya infrastruktur, serta korban jiwa. Pengendalian banjir menjadi sangat penting untuk mengurangi dampak negatifnya. Oleh karena itu alangkah baiknya kita melakukan Vegetasi di sepanjang sungai dan lahan basah untuk mengurangi risiko banjir dengan menyerap dan menyimpan air hujan. Pengendalian banjir memerlukan upaya kolaboratif antara pemerintah, sektor swasta, dan masyarakat. Pendekatan yang komprehensif dan berkelanjutan sangat diperlukan untuk

menjaga keberlanjutan lingkungan dan mengurangi risiko banjir

- b. Filtrasi air:** Filtrasi air merupakan teknik yang efektif dalam mengolah air limbah dan meningkatkan kualitas air bersih. Penggunaan metode filtrasi kontinu dan kombinasi filtrasi dapat memberikan hasil yang lebih baik dalam mengurangi polutan air. Implementasi teknologi filtrasi juga dapat meningkatkan kapasitas distribusi air bersih dan memenuhi kebutuhan air masyarakat Sungai dan ekosistem terkait seperti rawa memiliki kemampuan alami untuk menyaring polusi.
- c. Mitigasi iklim:** Perubahan iklim merupakan salah satu tantangan global yang paling mendesak. Mitigasi perubahan iklim menjadi sangat penting untuk mengurangi dampak negatifnya terhadap lingkungan dan kehidupan manusia. Konvensi internasional seperti Paris Agreement memainkan peran penting dalam mengarahkan upaya global untuk mengatasi perubahan iklim. Ekosistem sungai menyimpan karbon dalam vegetasi riparian dan sedimen.

3. Jasa Pendukung (*Supporting Services*)

Fungsi dasar ekosistem yang mendukung keberlangsungan hidup:

- a. Siklus nutrisi:** Ekosistem sungai membantu mendaur ulang nutrisi penting bagi pertumbuhan tanaman dan organisme air. pentingnya siklus nutrisi dalam menjaga keseimbangan elemen kimia dalam lingkungan. Tanpa siklus ini, nutrisi yang digunakan oleh makhluk hidup akan habis, menyebabkan kematian ekosistem¹. Proses ini melibatkan interaksi antara tumbuhan, hewan, dan mikroorganisme yang berkontribusi terhadap aliran energi dan materi
- b. Habitat:** Habitat adalah tempat di mana organisme hidup tinggal dan berkembang. Konservasi habitat sangat penting untuk menjaga keanekaragaman hayati dan menjaga keseimbangan ekosistem, Sungai menyediakan tempat

tinggal bagi berbagai spesies, termasuk yang memiliki nilai ekonomi atau konservasi.

4. Jasa Budaya (*Cultural Services*)

Sungai memiliki nilai non-material yang signifikan:

- a. **Rekreasi dan pariwisata:** konsep yang menggabungkan kegiatan rekreasi dan pariwisata dengan pengelolaan dan pemanfaatan sungai secara berkelanjutan. Teknik sungai mencakup berbagai metode dan teknologi untuk mengelola aliran air, memelihara kualitas air, serta memanfaatkan potensi sungai untuk keperluan rekreasi dan pariwisata. Sungai sering menjadi tempat untuk aktivitas seperti memancing, berenang, dan olahraga air lainnya.
- b. **Nilai spiritual dan estetika:** Sungai sering kali dianggap sebagai simbol kehidupan, kebersamaan, dan harmoni dengan alam. Aktivitas rekreasi di sekitar sungai, seperti berjalan-jalan, memancing, atau berenang, dapat memberikan pengalaman spiritual yang mendalam dan memperkaya kesejahteraan mental dan emosional. Selain itu, sungai juga menjadi sumber inspirasi bagi seniman dan penulis. Aliran air, keindahan lanskap, dan keheningan yang ditawarkan oleh sungai sering kali digambarkan dalam seni visual, puisi, dan sastra. Sungai tidak hanya memberikan manfaat fisik, tetapi juga memberikan nilai estetika yang membangkitkan jiwa dan memperkaya budaya. Banyak sungai memiliki makna budaya dan sejarah yang dalam bagi masyarakat setempat.

Fungsi Ekologis Sungai dalam Mendukung Kehidupan

Sungai adalah elemen penting dari ekosistem yang kompleks dan saling terkait. Fungsi ekologis utama sungai meliputi:

1. Transportasi Nutrisi dan Sedimen

Sungai berfungsi sebagai pengangkutan nutrisi dan sedimen dari daerah hulu ke hilir. Nutrisi seperti nitrogen dan fosfor yang terkandung dalam air sungai sangat penting untuk pertumbuhan tumbuhan di daerah aliran sungai. Sedimen yang dibawa oleh sungai juga berperan dalam membentuk dan

memelihara habitat di sekitar sungai. Sungai mengangkut nutrisi dan sedimen yang penting untuk kesuburan tanah di dataran banjir, mendukung produksi pertanian dan vegetasi alami.

2. Sirkulasi Air dalam Siklus Hidrologi

Sungai merupakan bagian penting dari siklus hidrologi, yang melibatkan pergerakan air dari atmosfer ke tanah dan kembali ke atmosfer. Sungai membantu mengalirkan air dari hujan dan saluran air lainnya, mengurangi risiko banjir, dan memastikan ketersediaan air untuk kebutuhan manusia, hewan, dan tumbuhan. Sungai memainkan peran penting dalam siklus hidrologi global dengan mengalirkan air dari daratan ke laut, menjaga keseimbangan air di berbagai wilayah.

3. Habitat untuk Keanekaragaman Hayati

Sungai menyediakan habitat yang kaya akan keanekaragaman hayati. Berbagai spesies ikan, amfibi, serangga air, moluska, dan tumbuhan air mendapatkan tempat tinggal di sungai. Keanekaragaman hayati ini penting untuk menjaga keseimbangan ekosistem dan memastikan kelangsungan hidup berbagai spesies. Ekosistem sungai mendukung berbagai spesies air tawar, termasuk ikan, burung, dan serangga, yang merupakan bagian penting dari rantai makanan.

4. Penyimpanan dan Regulasi Air

Sungai juga berperan dalam penyimpanan dan regulasi air. Sungai dapat menyimpan air dalam bentuk air permukaan dan tanah liat, yang kemudian dapat digunakan selama musim kemarau. Selain itu, sungai membantu mengatur aliran air, mengurangi risiko banjir, dan memastikan ketersediaan air untuk kebutuhan sehari-hari. Lahan basah dan daerah tangkapan air sungai menyimpan air selama musim hujan dan melepaskannya perlahan selama musim kemarau, mengurangi risiko banjir dan kekeringan.

Manfaat Integrasi Jasa Ekosistem dalam Teknik Sungai

Integrasi jasa ekosistem dalam teknik sungai memberikan berbagai manfaat yang meliputi:

1. Keberlanjutan Ekologis

Integrasi jasa ekosistem dalam teknik sungai sangat penting untuk memastikan keberlanjutan ekologis. Teknik yang mengintegrasikan fungsi alami sungai, seperti penyediaan air bersih, pengaturan aliran air, dan pemeliharaan habitat, dapat membantu menjaga keseimbangan ekosistem. Ini juga berkontribusi pada penurunan dampak perubahan iklim dengan mempertahankan fungsi ekosistem yang penting seperti penyerapan karbon dan pengaturan suhu. Dengan mempertahankan fungsi ekologis sungai, pengelolaan berbasis ekosistem mendukung keanekaragaman hayati dan mengurangi degradasi lingkungan.

2. Efisiensi Biaya

Dengan mengintegrasikan jasa ekosistem, biaya pengelolaan sungai dapat lebih efisien. Metode alami cenderung lebih murah dan lebih mudah diterapkan dibandingkan dengan teknologi yang kompleks dan mahal. Misalnya, penggunaan vegetasi riparian untuk mengurangi erosi dan meningkatkan kualitas air dapat menjadi solusi yang lebih ekonomis dibandingkan dengan konstruksi infrastruktur fisik yang besar. Solusi alami seperti restorasi vegetasi riparian lebih ekonomis dibandingkan dengan pembangunan infrastruktur abu-abu (*grey infrastructure*) seperti bendungan.

3. Manfaat Sosial dan Ekonomi

Sungai yang dikelola secara berkelanjutan mendukung kesejahteraan masyarakat melalui peningkatan kualitas air, penyediaan bahan makanan, dan peluang pariwisata. Integrasi jasa ekosistem dalam teknik sungai juga memberikan manfaat sosial dan ekonomi yang signifikan. Sungai yang dikelola dengan baik dapat menyediakan sumber air yang aman untuk konsumsi manusia, irigasi pertanian, dan industri. Selain itu, sungai yang sehat dapat menjadi pusat aktivitas ekonomi seperti perikanan dan pariwisata, yang berkontribusi pada peningkatan kesejahteraan masyarakat lokal.

Studi Kasus: Restorasi Sungai Berbasis Jasa Ekosistem

Restorasi sungai berbasis jasa ekosistem adalah pendekatan yang bertujuan untuk memulihkan fungsi alami sungai dengan memanfaatkan layanan ekosistem yang diberikan oleh ekosistem sungai itu sendiri. Pendekatan ini tidak hanya berfokus pada pemulihan fisik sungai, tetapi juga pada pemulihan fungsi ekosistem yang penting untuk keberlanjutan lingkungan dan kesejahteraan masyarakat

Salah satu contoh implementasi adalah restorasi Sungai Rhine di Eropa. Melalui pendekatan berbasis ekosistem, wilayah dataran banjir dipulihkan untuk mengurangi risiko banjir, sekaligus meningkatkan habitat bagi keanekaragaman hayati. Selain itu, proyek ini berhasil meningkatkan kualitas air dan mendukung kegiatan ekonomi seperti pariwisata dan perikanan (WWF, 2016).

Tantangan dalam Mengintegrasikan Jasa Ekosistem

Beberapa tantangan yang dihadapi meliputi:

1. Konflik Kepentingan

Salah satu tantangan utama dalam mengintegrasikan jasa ekosistem adalah konflik kepentingan antara berbagai pemangku kepentingan, seperti pemerintah, sektor swasta, dan masyarakat. Setiap kelompok mungkin memiliki tujuan yang berbeda, yang dapat menyebabkan ketegangan dan hambatan dalam implementasi kebijakan yang berkelanjutan. Misalnya, sektor swasta mungkin lebih fokus pada keuntungan jangka pendek, sementara pemerintah dan masyarakat mungkin lebih berorientasi pada keberlanjutan jangka panjang. Aktivitas manusia seperti pembangunan infrastruktur sering bertentangan dengan pelestarian ekosistem sungai.

2. Kurangnya Data dan Penelitian

Kurangnya data dan penelitian yang memadai tentang jasa ekosistem juga menjadi tantangan besar. Tanpa data yang akurat dan komprehensif, sulit untuk merancang kebijakan yang efektif dan berkelanjutan. Penelitian yang terbatas dapat menghambat pemahaman tentang dampak jasa ekosistem dan cara terbaik untuk mengintegrasikannya dalam pengelolaan

lingkungan. Nilai ekonomi jasa ekosistem sering kali sulit diukur, sehingga kurang diperhitungkan dalam perencanaan.

3. Keterbatasan Kebijakan

Keterbatasan kebijakan juga merupakan tantangan signifikan dalam mengintegrasikan jasa ekosistem. Kebijakan yang tidak mendukung atau bahkan menghalangi penggunaan jasa ekosistem dapat menghambat upaya untuk mencapai keberlanjutan. Kebijakan yang tidak konsisten atau tidak terkoordinasi dengan baik dapat menyebabkan ketidakpastian hukum dan hambatan administratif yang menghambat implementasi kebijakan berkelanjutan. Kebijakan yang mendukung pendekatan berbasis ekosistem masih minim di banyak negara.

Rekomendasi untuk Masa Depan

1. Peningkatan Edukasi dan Kesadaran

Peningkatan edukasi dan kesadaran masyarakat tentang pentingnya lingkungan dan jasa ekosistem adalah langkah pertama yang krusial. Program edukasi yang melibatkan sekolah, komunitas, dan media massa dapat membantu meningkatkan pemahaman masyarakat tentang pentingnya menjaga lingkungan. Penyuluhan dan kampanye kesadaran lingkungan dapat mendorong tindakan yang lebih bertanggung jawab terhadap alam. Meningkatkan pemahaman tentang jasa ekosistem di kalangan pemangku kepentingan.

2. Penelitian dan Inovasi

Penelitian dan inovasi dalam bidang lingkungan harus terus ditingkatkan untuk menemukan solusi baru dan lebih baik dalam pengelolaan ekosistem. Pengembangan teknologi hijau, praktik pertanian berkelanjutan, dan metode pengolahan limbah yang efisien adalah beberapa contoh area yang memerlukan perhatian lebih. Kolaborasi antara akademisi, industri, dan pemerintah dapat mempercepat kemajuan di bidang ini. Mengembangkan metode untuk mengukur dan memonetisasi nilai jasa ekosistem.

3. Penguatan Kebijakan

Kebijakan yang mendukung keberlanjutan harus diperkuat dan diimplementasikan secara konsisten. Pemerintah perlu menetapkan regulasi yang ketat untuk melindungi lingkungan dan mengintegrasikan prinsip-prinsip keberlanjutan dalam semua aspek pembangunan. Penguatan kebijakan juga harus mencakup insentif bagi sektor swasta yang berinvestasi dalam praktek-praktek ramah lingkungan. Menerapkan regulasi yang mendorong pengelolaan sungai berbasis ekosistem.

Kesimpulan

Jasa ekosistem adalah konsep penting dalam teknik sungai karena mencerminkan fungsi ekologis sungai dalam mendukung kehidupan manusia. Integrasi jasa ekosistem dalam pengelolaan sungai tidak hanya memberikan manfaat ekologis tetapi juga sosial dan ekonomi, menjadikannya strategi penting untuk mencapai keberlanjutan. Kolaborasi antara pemerintah, masyarakat, dan sektor swasta diperlukan untuk mengatasi tantangan dan memastikan pengelolaan sungai yang berkelanjutan.

Studi Kasus: Restorasi Sungai Rhine

Restorasi Sungai Rhine fokus pada pengembalian habitat alami sungai dengan cara memperbaiki struktur sungai, seperti menambahkan batu-batu, akar pohon, dan membuat pinggiran sungai lebih alami. Hal ini bertujuan untuk mengembalikan keanekaragaman hayati dan memastikan bahwa berbagai spesies hewan dan tumbuhan dapat hidup kembali di habitat mereka.

Restorasi Sungai Rhine di Eropa adalah salah satu contoh sukses yang menunjukkan bagaimana pengelolaan berbasis ekosistem berkontribusi pada SDGs. Proyek ini mengintegrasikan restorasi lahan basah, vegetasi riparian, dan pengurangan polusi untuk meningkatkan kualitas air dan mengurangi risiko banjir. Hasilnya, Sungai Rhine kini menjadi salah satu sungai dengan kualitas air terbaik di Eropa, mendukung ekosistem yang lebih sehat dan memberikan manfaat langsung kepada masyarakat sekitar (WWF, 2016).

Dampak terhadap Keanekaragaman Hayati dan Mitigasi Perubahan Iklim

Dampak terhadap Keanekaragaman Hayati

Sungai adalah ekosistem yang kaya akan keanekaragaman hayati, mendukung berbagai spesies flora dan fauna. Pendekatan berbasis ekosistem memainkan peran penting dalam melestarikan dan memulihkan keanekaragaman hayati sungai.

- 1. Restorasi Habitat:** Restorasi habitat adalah upaya untuk memulihkan ekosistem yang rusak atau hilang, sehingga dapat mendukung kehidupan berbagai spesies. Pengelolaan berbasis ekosistem mencakup restorasi habitat alami, seperti lahan basah dan vegetasi riparian, yang menjadi tempat hidup penting bagi berbagai spesies. Misalnya, proyek restorasi Sungai Ciliwung di Indonesia berhasil meningkatkan populasi ikan lokal dengan mengurangi polusi dan memperbaiki habitat akuatik (Iskandar et al., 2019).
- 2. Perlindungan Spesies Terancam:** Perlindungan spesies terancam adalah langkah penting untuk mencegah kepunahan dan memastikan kelangsungan hidup spesies yang berisiko Sungai yang dikelola dengan pendekatan ekosistem menyediakan kondisi yang mendukung kelangsungan hidup spesies terancam, seperti lumba-lumba sungai di Amazon dan ikan salmon di Amerika Utara (Moss et al., 2015).

Dampak terhadap Mitigasi Perubahan Iklim

Sungai yang dikelola secara berkelanjutan dapat berkontribusi pada mitigasi perubahan iklim melalui beberapa mekanisme:

- 1. Penyerapan Karbon:** Ekosistem sungai seperti lahan basah dan vegetasi riparian menyimpan karbon dalam biomassa dan sedimen, membantu mengurangi konsentrasi karbon dioksida di atmosfer (Mitsch et al., 2015). Sungai yang dikelola secara berkelanjutan dapat berkontribusi pada mitigasi perubahan iklim melalui mekanisme penyerapan karbon. Vegetasi di sekitar sungai, seperti pohon dan rumput, dapat menyerap karbon dari atmosfer dan menyimpannya dalam biomassa dan tanah. Ini membantu mengurangi jumlah karbon dioksida yang

berada di atmosfer, yang merupakan salah satu penyebab utama perubahan iklim

2. **Reduksi Emisi Metana:** Pengelolaan sungai yang berkelanjutan juga dapat membantu mengurangi emisi metana. Metana adalah gas rumah kaca yang lebih kuat daripada karbon dioksida dalam menghangatkan atmosfer. Dengan menjaga kualitas air dan mengelola sungai secara bijaksana, kita dapat mengurangi pembentukan metana dari sumber-sumber seperti limbah organik yang membusuk di dalam air. Restorasi ekosistem lahan basah dapat mengurangi emisi metana dengan meningkatkan kadar oksigen dalam air dan tanah (Verhoeven et al., 2018).
3. **Pengelolaan Banjir:** Pengelolaan sungai yang berkelanjutan juga berperan penting dalam pengelolaan banjir. Dengan memulihkan habitat alami seperti rawa-rawa dan area kering, sungai dapat menyerap lebih banyak air saat banjir, mengurangi kecepatan aliran air, dan mengurangi risiko banjir. Ini tidak hanya melindungi kota dan pertanian dari kerusakan, tetapi juga membantu menjaga keseimbangan ekosistem yang penting untuk keanekaragaman hayati. Sungai yang dikelola secara alami memiliki kapasitas yang lebih besar untuk menyerap air hujan, mengurangi risiko banjir yang sering diperburuk oleh perubahan iklim.

Studi Kasus: Restorasi Lahan Basah di Mississippi

Restorasi lahan basah di sepanjang Sungai Mississippi, Amerika Serikat, menunjukkan bagaimana ekosistem sungai dapat mendukung mitigasi perubahan iklim. Proyek ini mencakup penanaman vegetasi asli dan pengurangan polusi untuk meningkatkan kapasitas penyimpanan karbon. Hasilnya, lahan basah ini mampu menyerap lebih dari 200 juta ton karbon dioksida per tahun, mendukung tujuan mitigasi iklim global (Opperman et al., 2017).

Manfaat Sinergis dari Pendekatan Berbasis Ekosistem Keberlanjutan Ekologi

Pendekatan berbasis ekosistem (*Ecosystem-Based Management*, EBM) bertujuan untuk menjaga keseimbangan ekosistem secara keseluruhan. Dengan mempertimbangkan interaksi antara berbagai komponen ekosistem, EBM dapat membantu memastikan bahwa ekosistem tetap sehat dan berfungsi dengan baik. Ini termasuk pelestarian keanekaragaman hayati, peningkatan kualitas air, dan pengelolaan sumber daya alam secara berkelanjutan. Pengelolaan sungai berbasis ekosistem mendukung keberlanjutan ekologi dengan memperkuat fungsi alami sungai, termasuk siklus nutrisi, transportasi sedimen, dan penyediaan habitat. Fungsi-fungsi ini adalah dasar bagi ekosistem yang sehat dan stabil.

Keberlanjutan Ekonomi

Pendekatan berbasis ekosistem juga memberikan manfaat ekonomi yang signifikan. Dengan menjaga ekosistem yang sehat, kita dapat memastikan bahwa sumber daya alam tetap tersedia untuk jangka panjang. Ini penting untuk sektor-sektor seperti pertanian, perikanan, dan pariwisata, yang bergantung pada ekosistem yang sehat untuk keberlanjutan ekonomi mereka. Pendekatan ini memberikan manfaat ekonomi jangka panjang melalui pengurangan biaya yang terkait dengan kerusakan ekosistem, pengelolaan banjir, dan mitigasi bencana. Sungai yang sehat juga mendukung sektor perikanan, pariwisata, dan pertanian. Manfaat sosial dari pendekatan berbasis ekosistem juga sangat besar. Dengan menjaga ekosistem yang sehat, kita dapat meningkatkan kualitas hidup masyarakat lokal. Ini termasuk akses ke air bersih, tanah yang subur, dan sumber daya alam lainnya yang penting untuk kesejahteraan manusia. Selain itu, pendekatan ini juga dapat membantu mencegah konflik yang mungkin timbul akibat persaingan sumber daya.

Keberlanjutan Sosial

Keberlanjutan sosial adalah konsep yang mencakup aspek kesejahteraan manusia yang berkelanjutan dalam jangka panjang.

Ini melibatkan penciptaan dan pemeliharaan kondisi sosial yang memungkinkan individu dan komunitas untuk hidup sehat, produktif, dan harmonis. Keberlanjutan sosial berfokus pada peningkatan kesejahteraan masyarakat secara keseluruhan. Ini mencakup akses ke layanan kesehatan yang berkualitas, pendidikan yang memadai, perumahan yang layak, dan kesempatan kerja yang adil. Dengan memenuhi kebutuhan dasar ini, masyarakat dapat berkembang dan mencapai potensi penuh mereka. Dengan menyediakan air bersih, habitat ikan, dan perlindungan terhadap bencana alam, pengelolaan berbasis ekosistem meningkatkan kualitas hidup masyarakat dan mendukung ketahanan sosial.

Kesimpulan

Pendekatan berbasis ekosistem dalam pengelolaan sungai berkontribusi secara signifikan terhadap keberlanjutan lingkungan. Strategi ini mendukung tujuan SDGs, melestarikan keanekaragaman hayati, dan membantu mitigasi perubahan iklim. Dengan mengintegrasikan fungsi ekologi sungai ke dalam perencanaan dan kebijakan, pengelolaan berbasis ekosistem dapat memberikan manfaat yang luas bagi lingkungan, ekonomi, dan masyarakat.

Toward Sustainable Communities: Solutions for Citizens and Their Governments - Roseland, M. (2012). New Society Publishers.

4.2 Jenis-Jenis Jasa Ekosistem yang Relevan dalam Konteks Sungai

Pendahuluan

Sungai merupakan bagian integral dari ekosistem yang memberikan berbagai manfaat ekonomi, sosial, dan lingkungan bagi masyarakat. Jasa ekosistem sungai mencakup berbagai fungsi penting seperti penyediaan air bersih, pengendalian banjir, habitat bagi berbagai spesies, serta dukungan terhadap kegiatan ekonomi. Menurut laporan dari Badan Lingkungan Hidup Dunia, "Sungai yang sehat adalah kunci untuk menjaga keanekaragaman hayati dan menyediakan layanan ekosistem yang vital bagi masyarakat" (Badan Lingkungan Hidup Dunia, 2021). Oleh karena itu,

pemahaman dan pelestarian jasa ekosistem sungai sangat penting untuk keberlanjutan lingkungan dan kesejahteraan manusia.

Ekosistem sungai memberikan berbagai jasa ekosistem yang penting untuk mendukung kesejahteraan manusia dan keberlanjutan lingkungan. Jasa ekosistem sungai dapat dikategorikan menjadi empat jenis utama: jasa penyediaan (*provisioning*), jasa pengaturan (*regulating*), jasa pendukung (*supporting*), dan jasa budaya (*cultural*) (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Setiap jenis jasa ini memiliki peran penting dalam mendukung kehidupan manusia dan keberlanjutan lingkungan.

Jasa ekosistem adalah manfaat yang diperoleh manusia dari ekosistem alami yang mencakup dimensi ekologi, sosial, dan ekonomi. Dalam konteks sungai, jasa ekosistem mencakup berbagai layanan yang mendukung kehidupan manusia dan keberlanjutan lingkungan. Artikel ini membahas empat jenis jasa ekosistem utama yang relevan: jasa penyediaan, jasa pengaturan, jasa budaya, dan jasa pendukung. Setiap kategori berkontribusi secara signifikan terhadap kesejahteraan manusia dan fungsi ekologis.

1. Jasa Penyediaan

Jasa penyediaan adalah manfaat langsung yang diberikan oleh ekosistem sungai kepada manusia, terutama dalam bentuk produk fisik.

a. Air Bersih

Sungai adalah sumber utama air tawar untuk kebutuhan domestik, industri, dan pertanian. Air yang mengalir di sungai sering digunakan untuk:

1) Irigasi pertanian: Mendukung produktivitas tanaman dengan suplai air yang stabil. Irigasi pertanian adalah sistem penyediaan air secara buatan ke lahan pertanian untuk memenuhi kebutuhan air yang tidak dapat dipenuhi oleh curah hujan alami. Tujuannya adalah untuk mendukung pertumbuhan tanaman, meningkatkan hasil panen, dan memungkinkan pertanian di daerah yang kering atau mengalami musim kemarau.

- 2) **Air minum:** Pengelolaan sungai yang baik memastikan ketersediaan air berkualitas untuk konsumsi. air minum didefinisikan sebagai air yang dapat diminum dengan aman sepanjang hidup, dan tidak menimbulkan risiko kesehatan yang signifikan. WHO menekankan pada kualitas air yang bebas dari kontaminan berbahaya, baik mikrobiologis, kimia, maupun radioaktif, dalam konsentrasi yang dapat membahayakan kesehatan.
- 3) **Keperluan industri:** Industri menggunakan air sungai dalam proses produksi dan pendinginan. Industri adalah kegiatan ekonomi yang mengolah bahan mentah, bahan baku, barang setengah jadi, dan barang jadi menjadi barang dengan nilai yang lebih tinggi untuk penggunaannya, termasuk kegiatan rancang bangun dan perekayasaan industri. Industri merupakan suatu sektor ekonomi yang melakukan kegiatan produktif untuk mengolah bahan mentah menjadi barang jadi atau barang setengah jadi, sering disebut sebagai industri pembangunan. Industri sangat penting karena sebagian besar kebutuhan manusia mulai dari makanan, minuman, pakaian, sampai alat-alat rumah tangga dihasilkan oleh industri. Selain menghasilkan berbagai keperluan hidup, juga merupakan sumber nafkah bagi sebagian penduduk di dunia.

b. Material Sedimentasi

Material sedimentasi, seperti pasir dan kerikil, adalah sumber daya penting untuk pembangunan infrastruktur:

- 1) **Pasir sungai:** Bahan utama dalam pembuatan beton. Pasir sungai adalah partikel-partikel sedimen yang dihasilkan dari erosi batuan di sekitar sungai dan kemudian diangkut oleh aliran air sungai. Sedimen ini terdiri dari berbagai ukuran partikel, mulai dari pasir halus hingga pasir kasar, yang kemudian terendap di dasar sungai atau di area perairan lainnya¹. Proses

sedimentasi ini penting dalam memahami dinamika sungai dan perubahan lingkungan sekitarnya.

- 2) **Kerikil:** Digunakan dalam konstruksi jalan dan bangunan. Kerikil adalah agregat berukuran kasar yang digunakan sebagai komponen utama dalam pembuatan beton dan aspal. Kerikil dapat berasal dari hasil pemecahan batuan alami atau dapat dihasilkan secara buatan. Dalam konstruksi jalan, kerikil digunakan sebagai lapisan dasar untuk memberikan stabilitas dan dukungan struktural. Pada konstruksi bangunan, kerikil digunakan dalam campuran beton untuk meningkatkan kekuatan dan ketahanan struktur.

Pengelolaan yang tepat diperlukan untuk mencegah eksploitasi berlebihan yang dapat merusak ekosistem sungai (Kondolf et al., 2001).

c. Ikan dan Sumber Daya Hayati Lainnya

Sungai menyediakan habitat bagi berbagai spesies ikan yang menjadi sumber makanan dan mata pencaharian bagi masyarakat:

- 1) **Perikanan tradisional:** Mendukung ekonomi lokal melalui kegiatan penangkapan ikan. Kegiatan penangkapan ikan yang dilakukan oleh masyarakat lokal menggunakan metode dan alat tradisional. Kegiatan ini tidak hanya mendukung ekonomi lokal melalui penjualan hasil tangkapan, tetapi juga mempertahankan budaya dan tradisi masyarakat setempat.
- 2) **Akuakultur berbasis sungai:** Memberikan sumber protein penting bagi masyarakat. Praktik budidaya ikan dan organisme laut lainnya yang dilakukan di lingkungan alami sungai. Ini mencakup berbagai metode seperti budidaya ikan di kolam terbuka, penangkapan ikan liar, dan pengelolaan ekosistem sungai untuk meningkatkan produksi ikan secara

berkelanjutan. Akuakultur berbasis sungai tidak hanya memberikan sumber protein penting bagi masyarakat, tetapi juga berkontribusi terhadap ekonomi lokal dan kesejahteraan masyarakat setempat.

Studi menunjukkan bahwa sungai yang sehat mendukung populasi ikan yang stabil, yang berdampak langsung pada ketahanan pangan lokal (Welcomme, 2001).

2. Jasa Pengaturan

Jasa pengaturan mencakup manfaat yang berasal dari kemampuan ekosistem sungai dalam mengatur proses alami untuk menjaga keseimbangan lingkungan.

a. Pengendalian Banjir

Vegetasi riparian dan lahan basah di sepanjang sungai memiliki peran penting dalam menyerap dan menyimpan air:

- 1) **Vegetasi riparian:** Tumbuhan yang tumbuh di sepanjang tepi sungai, danau, atau badan air lainnya. Vegetasi ini memiliki peran penting dalam mengurangi kecepatan aliran air dan mencegah limpasan berlebihan dengan menyaring sedimen dan polutan sebelum mencapai badan air. Tanaman ini membantu memperlambat aliran air sehingga mengurangi erosi dan memperbaiki kualitas air. Selain itu, vegetasi riparian juga berfungsi sebagai habitat bagi berbagai jenis flora dan fauna, serta membantu menjaga keseimbangan ekosistem di sekitar perairan.
- 2) **Lahan basah:** Ekosistem yang terdiri dari area tanah yang jenuh air secara permanen atau musiman. Lahan basah bertindak sebagai spons alami yang menyerap air hujan dan melepaskannya perlahan-lahan ke atmosfer melalui proses evapotranspirasi. Proses ini membantu menjaga kelembapan udara dan mengatur pola hujan lokal. Selain itu, lahan basah berfungsi sebagai penyaring alami yang membersihkan air dari

polutan sebelum kembali ke siklus air, sehingga mengurangi risiko banjir di hilir.

Pendekatan berbasis ekosistem untuk pengendalian banjir lebih ekonomis dibandingkan dengan infrastruktur buatan seperti bendungan (Brauman et al., 2007).

b. Filtrasi Polusi

Sungai memiliki kemampuan alami untuk menyaring polusi dan meningkatkan kualitas air:

1) Mikroorganisme alami: Menguraikan polutan organik dalam air. Mikroorganisme alami, seperti bakteri, jamur, dan alga, memainkan peran penting dalam proses biodegradasi di lingkungan air. Proses ini melibatkan mikroorganisme yang memecah bahan organik menjadi senyawa yang lebih sederhana melalui mekanisme biokimia. Mikroorganisme ini dapat menempel pada permukaan bahan organik dan menguraikannya melalui enzim yang mereka produksi. Proses ini tidak hanya membantu mengurangi polutan organik dalam air, tetapi juga mendukung keseimbangan ekosistem dengan mendaur ulang bahan kimia vital seperti karbon dan nitrogen.

2) Vegetasi di sekitar sungai: Dikenal sebagai vegetasi riparian, berperan penting dalam menyerap nutrisi berlebih seperti nitrogen dan fosfor yang berasal dari limpasan pertanian. Tanaman ini berfungsi sebagai filter alami yang menyaring nutrisi dan polutan sebelum masuk ke badan air, sehingga membantu menjaga kualitas air sungai dan mengurangi risiko eutrofikasi. Selain itu, vegetasi riparian juga membantu mengurangi erosi dan menjaga stabilitas tepi sungai.

Menurut Ghermandi et al. (2010), ekosistem sungai yang sehat dapat secara signifikan mengurangi tingkat pencemaran air.

c. Stabilisasi Tanah

Vegetasi di sepanjang sungai membantu mencegah erosi tanah dengan menahan partikel tanah pada tempatnya:

- 1) **Akar tanaman:** Akar tanaman yang tumbuh di sepanjang tepi sungai memiliki kemampuan untuk mengikat tanah, sehingga mencegah kerusakan yang disebabkan oleh aliran air. Akar tanaman menembus dan memadatkan tanah, meningkatkan stabilitas dan mengurangi risiko erosi. Menurut sebuah studi oleh [Plasticsmartcities.wwf.id](https://www.plasticsmartcities.org/), akar tanaman berfungsi sebagai pengikat tanah alami, yang membantu menjaga integritas tepi sungai dan mengurangi laju erosi.
- 2) **Buffer alami:** Mengurangi dampak aliran air yang deras terhadap tepi sungai. Tanaman yang tumbuh di sepanjang sungai dapat memperlambat aliran air, mengurangi energi kinetik yang dapat menyebabkan erosi. Sebagai hasilnya, buffer alami ini membantu menjaga kestabilan tepi sungai dan mengurangi risiko banjir. Sebuah penelitian oleh Kompasiana (2024) menjelaskan bahwa vegetasi riparian berfungsi sebagai penghalang fisik yang dapat menyerap kekuatan aliran air, sehingga mengurangi potensi limpasan dan banjir. Stabilisasi tanah ini penting dalam melindungi infrastruktur seperti jembatan dan jalan yang berdekatan dengan sungai (Naiman & Decamps, 1997).

3. Jasa Budaya

Jasa budaya mencakup manfaat non-material yang diperoleh manusia dari ekosistem sungai, seperti nilai estetika, spiritual, dan rekreasi.

a. Nilai Estetika

Sungai memiliki keindahan alam yang memberikan ketenangan dan inspirasi:

- 1) **Pemandangan indah:** Banyak sungai menjadi lokasi favorit untuk fotografi dan seni. Pemandangan sungai

yang indah dengan air yang mengalir, vegetasi riparian yang hijau, dan kehidupan liar di sekitarnya memberikan latar belakang yang menakjubkan bagi seniman dan fotografer. Sungai sering kali dijadikan objek dalam lukisan, fotografi, dan karya seni lainnya karena keindahannya yang alami dan menenangkan.

- 2) **Nilai properti:** Rumah dan bangunan di dekat sungai sering kali memiliki nilai ekonomi yang lebih tinggi. Properti yang terletak di dekat sungai umumnya memiliki nilai jual yang lebih tinggi karena akses ke pemandangan alami dan keindahan alam yang mereka tawarkan. Selain itu, lokasi di dekat sungai juga memberikan keuntungan tambahan seperti udara segar dan lingkungan yang lebih sejuk.

Penelitian menunjukkan bahwa akses ke lingkungan yang indah, termasuk sungai, meningkatkan kesejahteraan mental manusia (Ulrich et al., 1991).

b. Rekreasi

Sungai menawarkan berbagai aktivitas rekreasi yang menarik bagi masyarakat:

- 1) **Olahraga air:** Seperti kayak, arung jeram, dan memancing. Aktivitas ini tidak hanya memberikan hiburan tetapi juga manfaat kesehatan fisik. Sungai menyediakan lingkungan alami yang menantang dan menyenangkan untuk olahraga air.
- 2) **Ekowisata:** Sungai yang bersih dan terpelihara menjadi daya tarik wisata lokal. Ekowisata berbasis sungai memberikan peluang bagi wisatawan untuk menikmati keindahan alam sambil meningkatkan kesadaran akan pentingnya konservasi lingkungan.

Studi di Sungai Colorado menunjukkan bahwa sektor pariwisata berbasis sungai memberikan kontribusi ekonomi yang signifikan bagi komunitas lokal (Postel & Richter, 2003).

c. Nilai Spiritual

Banyak sungai memiliki makna spiritual dan budaya yang penting bagi masyarakat:

- 1) **Ritual keagamaan:** Seperti mandi suci di Sungai Gangga di India. Sungai sering dianggap suci dan menjadi tempat pelaksanaan berbagai upacara keagamaan. Hubungan ini menciptakan ikatan emosional yang kuat antara masyarakat dan sungai.
- 2) **Legenda lokal:** Sungai sering menjadi elemen kunci dalam cerita rakyat dan tradisi budaya. Banyak budaya memiliki mitos dan legenda yang berkaitan dengan sungai, yang menambah nilai spiritual dan emosional bagi masyarakat setempat.

Hubungan emosional dan spiritual ini mendorong upaya konservasi yang didukung oleh masyarakat setempat.

4. Jasa Pendukung

Jasa pendukung mencakup fungsi dasar ekosistem yang memastikan kelangsungan proses ekologis jangka panjang.

a. Siklus Nutrisi

Sungai memainkan peran kunci dalam mendaur ulang nutrisi penting:

- 1) **Pengendapan sedimen:** Sungai membawa nutrisi ke dataran banjir, meningkatkan kesuburan tanah. Proses ini penting untuk mempertahankan produktivitas pertanian di daerah sekitar sungai.
- 2) **Siklus karbon dan nitrogen:** Ekosistem sungai membantu mengatur pertukaran gas dan siklus elemen kimia penting. Proses ini mendukung keberlanjutan ekosistem dan keanekaragaman hayati.

Studi menunjukkan bahwa proses daur ulang nutrisi di ekosistem sungai mendukung produksi pertanian di daerah hilir (Fisher et al., 2004).

b. Habitat bagi Keanekaragaman Hayati

Sungai adalah habitat bagi berbagai spesies flora dan fauna:

- 1) Ikan dan invertebrata air:** Sungai menjadi rumah bagi berbagai spesies ikan dan invertebrata air yang merupakan bagian dari rantai makanan dan ekosistem lokal.
- 2) Burung dan mamalia:** Banyak burung dan mamalia bergantung pada sungai untuk air dan makanan. Sungai menyediakan sumber daya yang diperlukan untuk kelangsungan hidup berbagai spesies.

Keanekaragaman hayati yang tinggi membuat ekosistem sungai lebih tahan terhadap gangguan, seperti perubahan iklim atau polusi (Naiman et al., 2005).

Kesimpulan

Keempat jenis jasa ekosistem—penyediaan, pengaturan, budaya, dan pendukung—memiliki relevansi yang signifikan dalam konteks pengelolaan sungai. Jasa ini memberikan manfaat langsung maupun tidak langsung yang mendukung kesejahteraan manusia dan keberlanjutan lingkungan. Untuk memastikan keberlanjutan jasa-jasa ini, diperlukan pendekatan terpadu yang menggabungkan perlindungan ekosistem dengan pengelolaan sumber daya manusia. Kolaborasi antara pemerintah, masyarakat, dan sektor swasta menjadi kunci untuk mengatasi tantangan seperti degradasi lingkungan dan perubahan iklim.

c. Manfaat Integrasi Jasa Ekosistem dalam Teknik Sungai

Integrasi jasa ekosistem dalam teknik sungai memberikan berbagai manfaat yang signifikan untuk keberlanjutan lingkungan dan kesejahteraan masyarakat. Sungai yang dikelola dengan baik tidak hanya menyediakan air bersih untuk konsumsi, irigasi, dan industri, tetapi juga memainkan peran penting dalam pengaturan iklim lokal.

Vegetasi sepanjang tepi sungai berkontribusi dalam menyerap karbon dioksida dan mengatur suhu, yang sangat penting dalam menghadapi perubahan iklim. Selain itu, sungai yang sehat membantu mengendalikan banjir dan aliran air ekstrem, sehingga mengurangi risiko bencana bagi masyarakat. Ekosistem sungai juga berfungsi sebagai filter alami yang menguraikan dan menghilangkan limbah, menjaga kualitas air dan lingkungan. Keanekaragaman hayati yang terdapat di sungai mendukung keseimbangan ekosistem dan memberikan mata pencaharian bagi masyarakat yang bergantung pada perikanan. Nilai sosial dan budaya yang terkait dengan sungai menjadikannya pusat kehidupan masyarakat, tempat tradisi dan budaya lokal berkembang. Selain itu, sungai juga menyediakan pemandangan indah dan tempat rekreasi yang penting bagi kesejahteraan mental dan fisik manusia. Menurut laporan dari Badan Lingkungan Hidup Dunia, sungai yang sehat adalah kunci untuk menjaga keanekaragaman hayati dan menyediakan layanan ekosistem yang vital bagi masyarakat. Oleh karena itu, pelestarian jasa ekosistem perairan sungai harus menjadi prioritas dalam upaya menjaga keseimbangan ekosistem.

Integrasi jasa ekosistem dalam teknik sungai merupakan pendekatan holistik yang menggabungkan fungsi ekologi sungai dengan kebutuhan manusia. Pendekatan ini bertujuan untuk meningkatkan ketahanan lingkungan, mengurangi biaya jangka panjang, dan mendukung keberlanjutan ekologis serta sosial. Artikel ini menguraikan tiga manfaat utama integrasi jasa ekosistem dalam teknik sungai: peningkatan ketahanan lingkungan terhadap bencana, efisiensi biaya, dan dukungan terhadap keberlanjutan ekologis dan sosial.

1. Peningkatan Ketahanan Lingkungan terhadap Bencana

Sungai berperan penting dalam mitigasi bencana alam seperti banjir dan erosi. Dengan mengintegrasikan jasa ekosistem dalam teknik sungai, risiko bencana dapat dikurangi secara

signifikan melalui fungsi alami yang disediakan oleh ekosistem sungai.

Peningkatan ketahanan lingkungan terhadap bencana merujuk pada upaya untuk meningkatkan kemampuan lingkungan dalam menghadapi dan mengatasi dampak bencana. Menurut *World Health Organization* (WHO), bencana adalah gangguan serius yang mengganggu fungsi suatu komunitas atau masyarakat, menyebabkan kerugian manusia, material, ekonomi, atau lingkungan yang melampaui kemampuan komunitas tersebut untuk menanggulangnya. Ketahanan lingkungan terhadap bencana mencakup berbagai aspek, termasuk peningkatan kapasitas adaptasi dan mitigasi, serta pengelolaan risiko yang lebih baik.

Menurut *National Research Council* (2006), ketahanan mencakup kapasitas untuk menyerap tekanan atau kekuatan yang menghancurkan melalui perlawanan atau adaptasi, serta kemampuan untuk mengelola atau mempertahankan fungsi dan struktur dalam menghadapi bahaya. Organisasi Pendidikan, Keilmuan, dan Kebudayaan Perserikatan Bangsa-Bangsa (UNESCO) juga menekankan pentingnya perencanaan mitigasi bencana yang efektif untuk meningkatkan kapasitas masyarakat dalam mengatasi bencana.

Dengan demikian, peningkatan ketahanan lingkungan terhadap bencana adalah upaya untuk memastikan bahwa lingkungan dan komunitas dapat bertahan dan pulih dari dampak bencana dengan dampak minimum dan kerusakan.

a. Pengendalian Banjir

Vegetasi riparian dan lahan basah di sepanjang sungai adalah bagian dari ekosistem alami yang berfungsi sebagai pengendali banjir. Vegetasi ini membantu menyerap dan menyimpan air hujan, sehingga mengurangi limpasan permukaan yang berpotensi menyebabkan banjir besar. Penelitian oleh Brauman et al. (2007) menunjukkan bahwa ekosistem sungai yang sehat dapat menyerap hingga 90% limpasan air dari hujan besar, sehingga menurunkan intensitas banjir di daerah hilir.

Contoh implementasi dapat dilihat pada restorasi Sungai Danube di Eropa. Dalam proyek ini, kawasan dataran banjir yang sebelumnya telah dihilangkan dipulihkan untuk memungkinkan sungai meluap ke lahan basah alami selama musim hujan. Hal ini tidak hanya mengurangi risiko banjir tetapi juga meningkatkan habitat keanekaragaman hayati (WWF, 2016).

Pengendalian banjir adalah serangkaian upaya yang dirancang untuk mengurangi risiko dan dampak banjir pada lingkungan dan masyarakat. Menurut *National Research Council* (2006), pengendalian banjir mencakup metode struktural dan non-struktural. Metode struktural meliputi pembangunan infrastruktur seperti bendungan, tanggul, dan saluran drainase untuk mengendalikan aliran air. Sedangkan metode non-struktural mencakup upaya seperti pengelolaan lahan, penanaman pohon di tepi sungai, dan peningkatan kesadaran masyarakat tentang risiko banjir.

Menurut Dr. Ir. Robert J. Kodoatie dan Ir. Sugiyanto (2002), pengendalian banjir dalam perspektif lingkungan juga melibatkan pemahaman tentang penyebab banjir, seperti perubahan penggunaan lahan dan pola hujan yang tidak terduga. Dengan pendekatan yang komprehensif, pengendalian banjir dapat membantu mengurangi kerusakan ekonomi dan sosial yang disebabkan oleh banjir.

b. Pencegahan Erosi

Integrasi jasa ekosistem dalam teknik sungai juga mengurangi risiko erosi tanah di sepanjang tepi sungai. Vegetasi riparian memainkan peran kunci dalam stabilisasi tanah dengan memperkuat struktur tanah melalui akar tanaman. Selain itu, sedimentasi alami yang terjadi di sungai dapat mengurangi dampak erosi pada dataran rendah.

Menurut penelitian oleh Naiman & Decamps (1997), sungai yang dikelola dengan memperhatikan fungsi ekosistem alami menunjukkan tingkat erosi yang lebih rendah

dibandingkan dengan sungai yang telah dimodifikasi secara signifikan oleh aktivitas manusia.

Pencegahan erosi adalah serangkaian upaya yang dirancang untuk mengurangi atau menghentikan proses penghancuran tanah oleh faktor-faktor fisik seperti hujan, angin, dan aliran air. Menurut *National Research Council* (2006), pencegahan erosi mencakup metode struktural dan non-struktural. Metode struktural meliputi pembangunan infrastruktur seperti bendungan, tanggul, dan saluran drainase untuk mengendalikan aliran air. Sedangkan metode non-struktural mencakup upaya seperti penanaman pohon di tepi sungai, penanaman terumbu jagung sebagai pengaman tanah, dan peningkatan kesadaran masyarakat tentang risiko erosi.

Menurut Dr. Ir. Robert J. Kodoatie dan Ir. Sugiyanto (2002), pencegahan erosi dalam perspektif lingkungan juga melibatkan pemahaman tentang penyebab erosi, seperti perubahan penggunaan lahan dan pola hujan yang tidak terduga. Dengan pendekatan yang komprehensif, pencegahan erosi dapat membantu menjaga kesuburan tanah dan mengurangi kerusakan lingkungan.

2. Efisiensi Biaya Jangka Panjang Dibandingkan Solusi Teknis Konvensional

Pendekatan berbasis jasa ekosistem sering kali lebih ekonomis dibandingkan dengan solusi teknik konvensional, seperti pembangunan bendungan atau tanggul beton. Investasi dalam pemulihan dan pelestarian ekosistem sungai menghasilkan manfaat jangka panjang yang signifikan, baik dari segi penghematan biaya maupun peningkatan kualitas hidup masyarakat.

Efisiensi biaya jangka panjang dibandingkan solusi teknis konvensional mengacu pada perbandingan antara biaya total yang dikeluarkan untuk mempertahankan atau mengelola suatu sistem atau teknologi selama periode waktu yang lebih panjang, dibandingkan dengan biaya yang dikeluarkan untuk

solusi teknis konvensional yang mungkin lebih rendah pada awal tetapi lebih tinggi di masa depan.

Menurut National Research Council (2006), efisiensi biaya jangka panjang mempertimbangkan semua biaya yang terkait dengan implementasi dan operasional suatu teknologi atau sistem, termasuk biaya pemeliharaan, perbaikan, dan penggantian selama periode waktu tertentu. Solusi teknis konvensional, di sisi lain, mungkin memiliki biaya awal yang lebih rendah tetapi tidak mempertimbangkan biaya jangka panjang yang mungkin lebih tinggi akibat perawatan yang lebih sering atau peralihan teknologi yang diperlukan.

Dengan demikian, efisiensi biaya jangka panjang menekankan pentingnya evaluasi yang komprehensif terhadap semua biaya yang mungkin timbul selama siklus hidup suatu teknologi atau sistem, bukan hanya biaya awal.

a. Pengurangan Biaya Infrastruktur

Infrastruktur hijau, seperti lahan basah yang dipulihkan atau hutan riparian, memiliki biaya pembangunan dan pemeliharaan yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan infrastruktur abu-abu (*grey infrastructure*). Misalnya, lahan basah alami dapat menyimpan air hujan dan mengatur aliran sungai, sehingga mengurangi kebutuhan untuk membangun bendungan besar atau saluran air buatan.

Penelitian oleh Costanza et al. (1997) menunjukkan bahwa nilai ekonomis dari jasa ekosistem yang disediakan oleh lahan basah jauh lebih tinggi dibandingkan dengan biaya investasi awal untuk melestarikannya. Selain itu, lahan basah memiliki umur lebih panjang dan tidak memerlukan perawatan intensif seperti infrastruktur buatan.

Pengurangan biaya infrastruktur merujuk pada upaya untuk mengurangi biaya yang terkait dengan pembangunan, pemeliharaan, dan operasional infrastruktur. Menurut American Public Works Association (Stone, 1974), infrastruktur adalah fasilitas-fasilitas fisik yang dikembangkan atau dibutuhkan oleh agen-agen publik untuk fungsi-fungsi pemerintahan dalam penyediaan air, tenaga listrik, pembuangan limbah,

transportasi, dan pelayanan lainnya yang serupa untuk memfasilitasi tujuan-tujuan sosial dan ekonomi.

Dalam konteks ekonomi mikro, ketersediaan jasa pelayanan infrastruktur berpengaruh terhadap pengurangan biaya produksi. Pembangunan infrastruktur yang efisien dapat membantu mempercepat proses pembangunan nasional maupun regional, dengan berperan sebagai katalisator dalam proses pertumbuhan ekonomi. Oleh karena itu, pengurangan biaya infrastruktur adalah aspek penting dalam upaya untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas dalam penyediaan fasilitas publik yang diperlukan oleh masyarakat.

b. Efisiensi dalam Pemeliharaan dan Operasional

Teknik berbasis ekosistem juga mengurangi biaya pemeliharaan dan operasional. Infrastruktur konvensional sering kali memerlukan perawatan rutin untuk memastikan fungsinya tetap optimal. Sebaliknya, ekosistem alami dapat memulihkan dirinya sendiri melalui proses ekologis, sehingga biaya pemeliharaan dapat diminimalkan. Studi di Sungai Colorado menunjukkan bahwa restorasi ekosistem berbasis alam menghasilkan penghematan hingga 50% dalam biaya pemeliharaan tahunan dibandingkan dengan infrastruktur teknik konvensional (Postel & Richter, 2003).

Efisiensi dalam pemeliharaan dan operasional mengacu pada penggunaan sumber daya yang optimal untuk mencapai hasil yang diinginkan dengan biaya yang minimal. Menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia, efisiensi adalah kemampuan menjalankan tugas dengan baik dan tepat tanpa membuang waktu, tenaga, dan biaya.

Dalam konteks pemeliharaan dan operasional, efisiensi berarti menjaga peralatan dan fasilitas agar tetap berfungsi dengan baik selama periode waktu tertentu dengan menggunakan biaya dan tenaga yang paling sedikit. Tujuan utama dari efisiensi dalam pemeliharaan adalah untuk memperpanjang masa manfaat aset, memastikan peralatan siap dan tersedia secara operasional, mengurangi

penggunaan yang berlebihan, menjaga kualitas produk, dan mengurangi biaya pemeliharaan.

Menurut Marbun (2010), efisiensi adalah penghematan biaya dalam menjalankan suatu kegiatan berdasarkan anggaran yang telah dibuat sebelumnya dengan realisasi yang sesuai. Dengan kata lain, efisiensi adalah perbandingan terbaik antara masukan dan hasil yang dihasilkan.

3. Dukungan terhadap Keberlanjutan Ekologis dan Sosial

Keberlanjutan adalah elemen penting dalam pengelolaan sungai berbasis jasa ekosistem. Pendekatan ini tidak hanya mendukung keberlanjutan ekologi tetapi juga memberikan manfaat sosial yang signifikan.

Dukungan terhadap keberlanjutan ekologis dan sosial mengacu pada upaya untuk menjaga keseimbangan antara kebutuhan ekonomi, lingkungan, dan sosial dalam jangka panjang. Menurut Komisi Brundtland Perserikatan Bangsa-Bangsa (1987), keberlanjutan adalah "upaya memenuhi kebutuhan saat ini tanpa mengorbankan hak generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka sendiri."

Konsep ini mengintegrasikan tiga dimensi utama: ekonomi, lingkungan, dan sosial. Dimensi ekonomi berfokus pada pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan, dimensi lingkungan berfokus pada pelestarian lingkungan, dan dimensi sosial berfokus pada keadilan sosial.

Dengan demikian, dukungan terhadap keberlanjutan ekologis dan sosial mencakup berbagai upaya untuk memastikan bahwa pertumbuhan ekonomi tidak menguras sumber daya alam dan tidak membahayakan lingkungan, serta memastikan bahwa semua orang memiliki akses yang sama terhadap sumber daya dan kesempatan

a. Konservasi Keanekaragaman Hayati

Sungai yang dikelola dengan mempertimbangkan jasa ekosistem berfungsi sebagai habitat penting bagi berbagai spesies flora dan fauna. Konservasi keanekaragaman hayati di sepanjang sungai mendukung stabilitas ekosistem secara

keseluruhan. Menurut Naiman et al. (2005), keanekaragaman hayati yang tinggi membuat ekosistem lebih tahan terhadap gangguan, seperti perubahan iklim atau polusi.

Restorasi Sungai Yangtze di China adalah contoh keberhasilan pendekatan ini. Proyek restorasi ini tidak hanya memulihkan habitat ikan endemik tetapi juga meningkatkan kualitas air untuk kebutuhan domestik dan pertanian di wilayah sekitarnya.

Konservasi keanekaragaman hayati adalah upaya untuk melindungi dan menjaga keanekaragaman spesies flora dan fauna serta ekosistem mereka. Menurut Komisi Penyelamatan Spesies IUCN (*International Union for Conservation of Nature*), konservasi keanekaragaman hayati mencakup berbagai strategi seperti pelestarian habitat alami, rehabilitasi ekosistem yang rusak, dan pengelolaan sumber daya alam secara bijaksana untuk memastikan kelangsungan hidup spesies-spesies tersebut.

Dengan demikian, konservasi keanekaragaman hayati bertujuan untuk menjaga keseimbangan ekosistem dan memastikan bahwa semua spesies dapat bertahan dan berkembang dalam lingkungan yang aman dan sehat.

b. Peningkatan Kesejahteraan Sosial

Peningkatan kesejahteraan sosial merujuk pada upaya untuk meningkatkan kualitas hidup masyarakat melalui pemenuhan kebutuhan material, spiritual, dan sosial. Menurut Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2009, kesejahteraan sosial adalah kondisi terpenuhinya kebutuhan agar warga negara dapat hidup layak dan mampu mengembangkan diri, sehingga dapat melakukan fungsi sosialnya.

Konsep ini juga mencakup berbagai program dan kebijakan yang bertujuan untuk mencegah, mengatasi, atau memberikan kontribusi terhadap pemecahan masalah sosial, peningkatan kualitas hidup individu, kelompok, dan komunitas. Tujuan utama dari kesejahteraan sosial adalah mencapai kehidupan yang sejahtera dalam arti tercapainya

standar kehidupan pokok seperti sandang, perumahan, pangan, kesehatan, dan relasi sosial yang harmonis dengan lingkungannya.

Manfaat sosial dari integrasi jasa ekosistem meliputi peningkatan kualitas hidup masyarakat yang tinggal di sekitar sungai:

1) Rekreasi dan pariwisata: Sungai yang sehat menjadi lokasi favorit untuk aktivitas rekreasi, seperti memancing, berenang, dan olahraga air lainnya.

Rekreasi dan pariwisata adalah kegiatan perjalanan yang dilakukan oleh seseorang atau sekelompok orang untuk tujuan rekreasi, pengembangan pribadi, atau mempelajari keunikan daya tarik wisata yang dikunjungi dalam jangka waktu sementara.

Menurut *World Tourism Organization* (WTO), pariwisata adalah aktivitas perjalanan ke suatu tempat ke luar dari lingkungan keseharian mereka yang tujuannya untuk bersenang-senang. Pariwisata mencakup berbagai macam kegiatan wisata yang didukung dengan berbagai fasilitas serta layanan yang disediakan oleh masyarakat, pengusaha, maupun pemerintah.

Rekreasi, di sisi lain, adalah kegiatan yang dilakukan untuk menikmati waktu luang dengan cara yang menyenangkan dan memberi rasa segar, baik itu di alam atau di tempat buatan

2) Ketahanan pangan: Sungai yang terjaga menyediakan sumber daya seperti ikan dan air untuk pertanian. Penelitian oleh Ulrich et al. (1991) menunjukkan bahwa akses ke lingkungan alami, termasuk sungai yang bersih dan terpelihara, memiliki dampak positif terhadap kesehatan mental dan fisik masyarakat.

Ketahanan pangan adalah keadaan di mana semua orang setiap saat memiliki akses fisik, sosial, dan ekonomi pada makanan yang cukup, aman, dan bergizi

untuk memenuhi kebutuhan diet mereka dan kehidupan yang aktif dan sehat.

Menurut *Food and Agriculture Organization* (FAO), ketahanan pangan juga mencakup ketersediaan pangan yang cukup, aksesibilitas pangan yang merata, dan pemanfaatan pangan yang efektif.

Dengan demikian, ketahanan pangan tidak hanya berfokus pada ketersediaan makanan, tetapi juga pada kualitas, keamanan, dan aksesibilitas makanan bagi seluruh masyarakat.

c. Penguatan Ketahanan Komunitas

Integrasi jasa ekosistem juga memperkuat ketahanan komunitas terhadap perubahan iklim dan bencana alam. Dengan memanfaatkan fungsi alami sungai, masyarakat lokal menjadi lebih tangguh dalam menghadapi risiko banjir atau kekeringan. Hal ini mendukung tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs), khususnya dalam pengentasan kemiskinan dan ketahanan pangan.

Penguatan ketahanan komunitas mengacu pada upaya untuk meningkatkan kemampuan komunitas dalam menghadapi berbagai tantangan dan risiko, baik dari segi sosial, ekonomi, maupun lingkungan. Menurut ISO 37101:2016, sistem manajemen untuk pembangunan berkelanjutan di komunitas mencakup strategi untuk memperkuat ketahanan komunitas dengan cara memahami konteks komunitas, mengidentifikasi pemangku kepentingan, menetapkan tujuan pembangunan berkelanjutan, dan menerapkan tindakan yang efektif.

Dengan demikian, penguatan ketahanan komunitas melibatkan kolaborasi antara berbagai pemangku kepentingan seperti pemerintah, organisasi non-pemerintah, dan masyarakat untuk menciptakan komunitas yang lebih tangguh dan berkelanjutan.

Kesimpulan

Integrasi jasa ekosistem dalam teknik sungai memberikan manfaat yang luas dan signifikan, meliputi peningkatan ketahanan lingkungan terhadap bencana, efisiensi biaya

jangka panjang, dan dukungan terhadap keberlanjutan ekologis serta sosial. Pendekatan berbasis jasa ekosistem memungkinkan pengelolaan sungai yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Dengan melibatkan berbagai pemangku kepentingan, termasuk pemerintah, masyarakat, dan sektor swasta, strategi ini dapat diimplementasikan secara efektif untuk menciptakan sistem sungai yang mendukung kehidupan manusia dan alam.

d. Pendekatan Berbasis Ekosistem (*Ecosystem-Based Approach*) dalam Teknik Sungai

Pendekatan berbasis ekosistem (*Ecosystem-Based Approach*, EBA) adalah strategi pengelolaan sumber daya alam yang menempatkan ekosistem sebagai pusat perencanaan dan pelaksanaan tindakan untuk mendukung keberlanjutan lingkungan dan kesejahteraan manusia. Dalam konteks teknik sungai, pendekatan ini mengintegrasikan solusi alami dengan infrastruktur buatan untuk mengelola sungai secara berkelanjutan, mengurangi risiko bencana, dan melestarikan fungsi ekologis sungai. Artikel ini membahas dua elemen utama dalam pendekatan ini: penggunaan solusi alami dan kombinasi infrastruktur hijau serta infrastruktur abu-abu. Solusi alami, sebagai inti pendekatan ini, memanfaatkan proses alami untuk memperkuat fungsi ekologis sungai dan menyediakan jasa ekosistem yang penting bagi manusia. Salah satu contohnya adalah restorasi lahan basah, yang berperan penting dalam mengatur aliran air, menyaring polutan, menyediakan habitat bagi keanekaragaman hayati, serta berfungsi sebagai spons alami yang menyerap air hujan dan mengurangi limpasan, sehingga mengurangi risiko banjir di daerah hilir (Mitsch & Gosselink, 2015), dan juga memiliki kemampuan alami untuk menyaring nutrisi seperti nitrogen dan fosfor, sehingga meningkatkan kualitas air sungai (Verhoeven et al., 2006).

1. Penggunaan Solusi Alami dalam Pengelolaan Sungai

Solusi alami merupakan inti dari pendekatan berbasis ekosistem. Strategi ini memanfaatkan proses alami yang ada untuk memperkuat fungsi ekologis sungai dan menyediakan jasa ekosistem yang penting bagi manusia. Pendekatan penggunaan solusi alami dalam pengelolaan sungai adalah strategi yang memanfaatkan proses alami ekosistem untuk meningkatkan fungsi ekologis, mengurangi risiko bencana, dan menyediakan layanan ekosistem penting bagi manusia. Solusi ini mencakup tindakan seperti restorasi lahan basah, penanaman vegetasi riparian, dan pengelolaan daerah tangkapan air.

a. Restorasi Lahan Basah

Lahan basah memiliki peran kunci dalam mengatur aliran air, menyaring polutan, dan menyediakan habitat bagi keanekaragaman hayati. Restorasi lahan basah bertujuan untuk mengembalikan fungsi ekologis yang telah terganggu akibat aktivitas manusia, seperti pembangunan atau konversi lahan. Restorasi di Sungai Mississippi menunjukkan bahwa lahan basah mampu menyerap hingga 60% limpasan air selama musim hujan, mengurangi risiko banjir besar.

b. Fungsi hidrologi: Lahan basah bertindak sebagai spons alami yang menyerap air hujan dan mengurangi limpasan, sehingga mengurangi risiko banjir di daerah hilir. Hidrologi adalah cabang ilmu geografi yang mempelajari distribusi, pergerakan, dan sifat-sifat air di bumi. Ini mencakup proses-proses alami seperti penguapan, presipitasi (hujan), aliran permukaan, infiltrasi ke dalam tanah, serta pergerakan air di dalam tubuh tanah dan air permukaan. Ilmu ini juga mempelajari siklus hidrologi yang melibatkan interaksi antara atmosfer, permukaan bumi, dan badan air, serta dampaknya terhadap lingkungan dan kehidupan manusia (Mitsch & Gosselink, 2015).

c. Manfaat kualitas air: Lahan basah memiliki kemampuan alami untuk menyaring nutrien seperti

nitrogen dan fosfor, sehingga meningkatkan kualitas air sungai yang baik sangat penting untuk kesehatan manusia dan lingkungan. Menurut Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), air yang aman adalah air yang bebas dari kontaminan seperti logam berat, bahan kimia beracun, dan mikroorganisme patogen yang dapat menyebabkan penyakit. Kualitas air yang baik juga mendukung ekosistem yang sehat dan berkelanjutan (Verhoeven et al., 2006).

Studi di Sungai Mississippi menunjukkan bahwa restorasi lahan basah secara signifikan mengurangi banjir besar dengan menyerap hingga 60% limpasan air selama musim hujan (Opperman et al., 2017).

Penanaman Vegetasi Riparian

Vegetasi riparian adalah tanaman yang tumbuh di sepanjang tepi sungai. Vegetasi ini memberikan berbagai manfaat ekologis dan sosial:

- a. Pengendalian erosi:** Akar tanaman mengikat tanah di tepi sungai, mencegah erosi yang dapat merusak habitat dan infrastruktur. Erosi dapat dipercepat oleh aktivitas manusia seperti konstruksi, pengupasan vegetasi, dan penggalian tanah. Pengendalian erosi bertujuan untuk melindungi lingkungan, mengurangi sedimentasi, dan menjaga keberlanjutan pembangunan. Metode pengendalian erosi meliputi pendekatan vegetatif seperti penanaman rumput dan hutan kota, pengelolaan air seperti drainase berjenjang dan kolam penampung sedimen, serta struktur fisik seperti dinding penahan tanah dan check dam. Selain itu, rekayasa lereng seperti terasering dan penggunaan gabion juga efektif dalam mengurangi erosi. Pemantauan dan pemeliharaan berkala sangat penting untuk memastikan efektivitas metode pengendalian erosi yang diterapkan. Dengan demikian, pengendalian erosi yang efektif dapat melindungi lingkungan, mengurangi biaya pemeliharaan, dan mendukung pembangunan berkelanjutan.

- b. Pengaturan suhu air:** Vegetasi riparian memberikan naungan yang membantu menjaga suhu air, mendukung kehidupan akuatik seperti ikan. Proses ini melibatkan penggunaan alat dan teknik untuk memastikan suhu air tetap pada tingkat yang diinginkan. Salah satu metode yang umum digunakan adalah sistem kendali PID (Proportional-Integral-Derivative), yang dapat memberikan kontrol suhu yang akurat dan stabil. Selain itu, pengaturan suhu air juga penting dalam menjaga kualitas air untuk keperluan konsumsi manusia, pertanian, dan ekosistem perairan. Misalnya, dalam industri makanan dan minuman, pengaturan suhu air yang tepat sangat penting untuk menjaga kualitas produk dan mencegah kontaminasi. Di sektor pertanian, suhu air yang dikontrol dengan baik dapat meningkatkan efisiensi irigasi dan mendukung pertumbuhan tanaman. Dalam ekosistem perairan, pengaturan suhu air yang tepat dapat membantu menjaga keseimbangan ekosistem dan mendukung kehidupan berbagai spesies air.
- c. Keanekaragaman hayati:** Tumbuhan riparian menyediakan habitat penting bagi berbagai spesies, seperti burung dan serangga. Keanekaragaman hayati sangat penting bagi kelangsungan hidup manusia dan ekosistem global secara keseluruhan. Keanekaragaman hayati menyediakan berbagai layanan ekosistem yang penting, seperti penyediaan makanan, air bersih, dan bahan baku; pengaturan iklim dan siklus air; serta dukungan bagi proses-proses ekosistem seperti penyerbukan dan dekomposisi. Selain itu, keanekaragaman hayati juga memiliki nilai budaya dan estetika yang signifikan, serta berperan dalam penelitian ilmiah dan pendidikan. Kehilangan keanekaragaman hayati dapat mengganggu keseimbangan ekosistem dan mengancam kelangsungan hidup manusia. Oleh karena itu, upaya konservasi dan pengelolaan keanekaragaman hayati sangat penting untuk menjaga keberlanjutan lingkungan dan kesejahteraan manusia. (Naiman et al., 2005).

Penelitian di Sungai Mekong menunjukkan bahwa pemulihan vegetasi riparian meningkatkan kualitas habitat ikan dan mengurangi tingkat erosi hingga 40% (Sayer et al., 2013).

Pengelolaan Daerah Tangkapan Air

Pendekatan berbasis ekosistem juga mencakup pengelolaan daerah tangkapan air (*watershed management*). Daerah tangkapan air yang sehat memastikan bahwa aliran sungai tetap stabil dan bersih.

- a. Konservasi tanah dan air:** Teknik seperti terasering dan penanaman hutan di daerah tangkapan air membantu mengurangi limpasan permukaan dan erosi, serta menjaga kualitas dan kuantitas sumber daya air. Teknik konservasi tanah bertujuan untuk meningkatkan stabilitas tanah, memperbaiki kapasitas infiltrasi, dan mengurangi limpasan permukaan, sehingga mendukung keberlanjutan ekosistem serta produktivitas lahan pertanian. Menurut Lal (2015), konservasi tanah melibatkan pendekatan seperti terasering, penggunaan penutup tanah, dan agroforestri yang bertujuan mengurangi laju erosi dan menjaga kesuburan tanah.
- b. Pencegahan polusi:** Pengelolaan daerah tangkapan air dapat mengurangi pencemaran dari limbah domestik, pertanian, dan industri. Penggunaan teknologi ramah lingkungan dalam proses manufaktur telah terbukti secara signifikan mengurangi emisi limbah ke udara dan air (Berkhout & Smith, 2013). Selain itu, pendekatan ini juga melibatkan edukasi publik serta penguatan regulasi untuk mendorong penggunaan metode yang lebih berkelanjutan. Penerapan pencegahan polusi secara luas memiliki dampak positif terhadap kelestarian lingkungan, kesehatan manusia, dan pembangunan berkelanjutan. Gleick et al. (2017) menegaskan bahwa mengurangi pencemaran air pada sumbernya adalah langkah kunci dalam menjaga kualitas air bersih di wilayah tangkapan air serta mendukung ekosistem perairan yang sehat.

Proyek pengelolaan daerah tangkapan air di Kenya menunjukkan bahwa pelestarian hutan di bagian hulu mengurangi polusi sedimen hingga 50%, yang secara langsung meningkatkan kualitas air di hilir (McClain et al., 2014).

2. Kombinasi Infrastruktur Hijau dan Infrastruktur Abu-abu

Pendekatan berbasis ekosistem juga mengakui perlunya kombinasi antara infrastruktur hijau (berbasis alami) dan infrastruktur abu-abu (buatan manusia). Strategi ini menciptakan sistem pengelolaan sungai yang adaptif, efisien, dan berkelanjutan.

a. Infrastruktur Hijau

Infrastruktur hijau mencakup elemen alami seperti lahan basah, hutan riparian, dan daerah resapan air. Infrastruktur ini memberikan solusi jangka panjang yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan.

1) Pengendalian banjir alami: Lahan basah dan dataran banjir menyerap kelebihan air selama musim hujan, mengurangi beban pada tanggul dan saluran buatan. Strategi pengelolaan berbasis ekosistem yang mencakup restorasi dataran banjir alami telah terbukti lebih efektif dan ekonomis dalam jangka panjang dibandingkan dengan pendekatan infrastruktur abu-abu seperti bendungan dan tanggul (Van den Brink et al., 2016). Pendekatan pengendalian banjir alami menawarkan manfaat tambahan berupa peningkatan kualitas air, penyediaan habitat bagi keanekaragaman hayati, serta mitigasi perubahan iklim melalui penyerapan karbon di hutan dan lahan basah. Gleick et al. (2018) menegaskan bahwa solusi berbasis ekosistem seperti ini lebih adaptif terhadap perubahan iklim dan lebih berkelanjutan secara lingkungan serta ekonomi dibandingkan dengan pendekatan konvensional.

2) Penyerapan karbon: Hutan di sepanjang sungai menyimpan karbon dalam biomassa, membantu

mitigasi perubahan iklim. Proses alami penyerapan karbon terjadi di ekosistem daratan seperti hutan, lahan basah, dan padang rumput, di mana tanaman menyerap CO₂ melalui fotosintesis dan menyimpannya dalam bentuk biomassa dan bahan organik tanah. Menurut IPCC (2014), hutan tropis dan hutan boreal memiliki kapasitas penyerapan karbon terbesar, menyimpan sekitar 45% dari total karbon terestrial global. Selain itu, lahan basah memainkan peran penting dalam menyerap karbon karena akumulasi bahan organik yang terurai secara perlahan di lingkungan anaerobik. Mitsch dan Gosselink (2015) menunjukkan bahwa lahan basah tidak hanya menyimpan karbon dalam biomassa vegetasi tetapi juga dalam lapisan tanah yang kaya akan bahan organik, menjadikannya salah satu ekosistem yang paling efektif untuk penyerapan karbon jangka panjang. (Benedict & McMahon, 2012).

b. Infrastruktur Abu-abu

Infrastruktur abu-abu, seperti bendungan, tanggul, dan saluran beton, dirancang untuk memberikan solusi cepat terhadap masalah pengelolaan sungai. Namun, penggunaannya sering kali memiliki dampak negatif terhadap ekosistem.

1) Kelebihan: Infrastruktur ini dapat mengendalikan aliran air dengan presisi tinggi, memungkinkan manajemen air yang lebih baik di wilayah perkotaan dengan tingkat kerentanan yang tinggi. Selain itu, infrastruktur abu-abu memungkinkan pengelolaan air secara intensif dan efisien, serta mendukung pembangunan ekonomi melalui penyediaan air yang stabil dan terkendali (Gleick, 2018).

2) Kekurangan: Penggunaan berlebihan dapat mengganggu aliran alami sungai, memutus habitat, dan mengurangi kualitas air. Oleh karena itu, pendekatan modern sering mengintegrasikan infrastruktur abu-abu dengan solusi berbasis ekosistem untuk

menciptakan sistem pengelolaan air yang lebih berkelanjutan (Van den Brink et al., 2016). (Poff & Zimmerman, 2010).

c. Integrasi Infrastruktur Hijau dan Abu-abu

Kombinasi antara infrastruktur hijau dan abu-abu menghasilkan pendekatan hibrida yang lebih efektif. Contohnya:

1) Restorasi sungai dengan tanggul alami:

Penambahan vegetasi di sekitar tanggul buatan membantu memperkuat stabilitas struktur sekaligus mendukung fungsi ekologis. Tanggul alami tidak hanya mengurangi risiko erosi dan kerusakan tanggul akibat aliran air deras, tetapi juga menyediakan habitat bagi keanekaragaman hayati serta memperbaiki kualitas air. Opperman et al. (2017) menunjukkan bahwa restorasi sungai dengan tanggul alami mampu mengurangi risiko banjir secara signifikan sekaligus mendukung regenerasi ekosistem sungai.

2) Kolam retensi alami dan buatan:

Kolam ini dirancang untuk menahan air selama musim hujan, dengan elemen alami seperti vegetasi untuk menyaring polusi sementara kolam retensi buatan biasanya dibangun dengan bahan rekayasa seperti beton. Integrasi keduanya menggabungkan kekuatan penyimpanan air dari kolam buatan dengan kemampuan alami untuk menyaring polutan dan memperlambat aliran air. Studi oleh McClain et al. (2014) menunjukkan bahwa kolam retensi alami dan buatan yang terintegrasi dapat mengurangi polusi sedimen hingga 50% dan mengurangi tekanan pada sistem drainase perkotaan

Studi di Belanda menunjukkan bahwa pendekatan hibrida ini mengurangi risiko banjir hingga 70% dibandingkan dengan penggunaan infrastruktur abu-abu saja (Van den Brink et al., 2016).

Manfaat Pendekatan Berbasis Ekosistem

Pendekatan berbasis ekosistem memberikan manfaat yang luas dalam pengelolaan sungai:

- 1) **Ketahanan terhadap perubahan iklim:** Solusi alami lebih adaptif terhadap kondisi cuaca ekstrem dibandingkan dengan infrastruktur konvensional. " Hal ini sejalan dengan konsep *Nature-Based Solutions* (NBS) yang dipromosikan oleh IUCN. NBS diakui secara internasional sebagai pendekatan yang efektif untuk adaptasi dan mitigasi perubahan iklim. Misalnya, restorasi lahan basah dapat membantu mengurangi dampak banjir dan kekeringan, sementara penghijauan riparian dapat membantu mengurangi suhu air dan meningkatkan kualitas air di tengah perubahan iklim.
- 2) **Efisiensi biaya jangka panjang:** Infrastruktur hijau memerlukan biaya pemeliharaan yang lebih rendah dibandingkan dengan infrastruktur abu-abu. Karena membutuhkan perawatan yang lebih rendah dan memberikan manfaat tambahan, seperti peningkatan kualitas air dan pengurangan erosi. Studi oleh Benedict dan McMahon (2012) menunjukkan bahwa pengelolaan berbasis ekosistem memberikan penghematan biaya signifikan dalam pengendalian banjir dan konservasi air dibandingkan solusi konvensional berbasis teknologi.
- 3) **Keanekaragaman hayati:** Pendekatan ini melindungi habitat dan mendukung populasi spesies yang terancam punah. Hal ini sejalan dengan tujuan *Convention on Biological Diversity* (CBD), yang menekankan pentingnya konservasi keanekaragaman hayati sebagai bagian integral dari pembangunan berkelanjutan. PBE, dengan fokusnya pada pemeliharaan dan pemulihan habitat alami, berkontribusi langsung pada konservasi keanekaragaman hayati di ekosistem sungai.

4) Manfaat sosial: Sungai yang sehat menyediakan peluang untuk rekreasi, pariwisata, dan peningkatan kualitas hidup masyarakat. Hal ini mencerminkan pengakuan terhadap jasa ekosistem yang diberikan oleh sungai, yang meliputi manfaat rekreasi, estetika, dan budaya. Konsep jasa ekosistem telah diarusutamakan dalam berbagai kerangka kerja internasional, seperti *Millennium Ecosystem Assessment*, yang menekankan pentingnya kontribusi ekosistem terhadap kesejahteraan manusia.

Kesimpulan

Pendekatan berbasis ekosistem menggabungkan solusi alami seperti restorasi lahan basah, vegetasi riparian, dan pengelolaan daerah tangkapan air dengan infrastruktur buatan untuk menciptakan sistem pengelolaan sungai yang berkelanjutan. Kombinasi infrastruktur hijau dan abu-abu tidak hanya mengurangi risiko bencana tetapi juga mendukung keberlanjutan ekologis, ekonomi, dan sosial. Implementasi pendekatan ini membutuhkan kolaborasi antara pemerintah, masyarakat, dan sektor swasta untuk memastikan keberhasilannya.

d. Studi Kasus atau Implementasi Nyata Pengelolaan Sungai dan Wilayah Pesisir Berbasis Jasa Ekosistem

Integrasi jasa ekosistem dalam pengelolaan sungai dan wilayah pesisir telah menghasilkan berbagai proyek restorasi yang sukses di seluruh dunia. Dua contoh yang signifikan adalah proyek restorasi Sungai Ciliwung di Indonesia dan penggunaan hutan mangrove untuk pengendalian erosi serta banjir di wilayah pesisir. Kedua proyek ini menunjukkan bagaimana pendekatan berbasis ekosistem dapat memberikan manfaat ekologis, sosial, dan ekonomi secara berkelanjutan. Pengelolaan sungai dan wilayah pesisir berbasis jasa ekosistem merupakan pendekatan yang mengintegrasikan aspek ekologis, sosial, dan ekonomi dalam pengelolaan sumber daya alam yang

ada di sepanjang sungai dan pesisir. Pendekatan ini semakin penting seiring dengan meningkatnya tekanan terhadap ekosistem pesisir dan sungai, yang sering kali mengalami degradasi akibat aktivitas manusia seperti urbanisasi, perindustrian, dan eksploitasi berlebihan. Konsep jasa ekosistem mengacu pada manfaat yang diberikan oleh alam kepada manusia, seperti penyediaan air bersih, mitigasi bencana, peningkatan kualitas lingkungan, dan peningkatan kesejahteraan sosial-ekonomi masyarakat lokal.

1. Restorasi Sungai Ciliwung

a. Latar Belakang

Sungai Ciliwung, yang melintasi wilayah padat penduduk di Jakarta, telah mengalami degradasi lingkungan yang parah akibat urbanisasi, polusi, dan pendudukan lahan bantaran sungai. Akibatnya, fungsi ekologis sungai menurun, menyebabkan banjir musiman, penurunan kualitas air, dan hilangnya habitat.

Wilayah pesisir dan sungai memiliki peran yang sangat penting dalam kehidupan manusia. Sungai adalah sumber utama air bersih, irigasi pertanian, dan transportasi, sedangkan pesisir menjadi tempat tinggal bagi berbagai spesies dan memberikan manfaat ekonomi yang besar, seperti hasil tangkapan ikan dan potensi wisata. Namun, kedua wilayah ini sering kali mengalami tekanan akibat aktivitas manusia, seperti urbanisasi, industri, pertanian, dan penangkapan ikan yang tidak berkelanjutan. Selain itu, perubahan iklim yang menyebabkan meningkatnya frekuensi bencana alam seperti banjir, kekeringan, dan naiknya permukaan air laut juga memperburuk kondisi ekosistem sungai dan pesisir.

Degradasi ekosistem ini tidak hanya mengancam keberlanjutan sumber daya alam, tetapi juga mengurangi kapasitas ekosistem dalam menyediakan jasa yang sangat dibutuhkan oleh masyarakat.

Pengelolaan sungai dan wilayah pesisir berbasis jasa ekosistem merupakan pendekatan yang inovatif untuk memecahkan masalah ini. Pendekatan ini tidak hanya mempertimbangkan pemanfaatan sumber daya alam, tetapi juga berfokus pada keberlanjutan ekosistem dengan cara menghargai dan memanfaatkan jasa yang diberikan oleh alam. Jasa ekosistem ini meliputi berbagai manfaat, seperti penyediaan air, pengendalian bencana, dan pelestarian keanekaragaman hayati yang sangat penting untuk kelangsungan hidup manusia.

Pengelolaan berbasis jasa ekosistem bertujuan untuk mengintegrasikan aspek ekologi, sosial, dan ekonomi sehingga dapat menciptakan keseimbangan antara pembangunan dan konservasi lingkungan. Pendekatan ini juga mendorong kolaborasi antara pemerintah, masyarakat, dan sektor swasta dalam menciptakan solusi yang berkelanjutan bagi pengelolaan sumber daya alam.

b. Intervensi Restorasi

Proyek restorasi Sungai Ciliwung bertujuan untuk mengembalikan fungsi ekologis sungai melalui pendekatan berbasis ekosistem. Beberapa langkah yang dilakukan meliputi:

- 1) Penanaman vegetasi riparian:** Bantaran sungai ditanami vegetasi asli untuk mengurangi erosi, menyaring polusi, dan meningkatkan kualitas habitat. (Wardhana et al., 2020).
- 2) Pengelolaan sampah:** Program edukasi masyarakat diluncurkan untuk mengurangi pencemaran sampah domestik dan meningkatkan daur ulang.
- 3) Pemindahan penduduk di bantaran sungai:** Relokasi dilakukan untuk mengembalikan dataran banjir alami.
- 4) Pengendalian Pencemaran Air:** Salah satu langkah utama dalam proyek restorasi ini adalah pengendalian pencemaran air yang disebabkan oleh limbah domestik, industri, dan sampah.

- 5) **Rehabilitasi Daerah Tangkapan Air:** Restorasi hulu Sungai Ciliwung menjadi prioritas dalam proyek ini untuk mengembalikan daya dukung ekosistem di wilayah tersebut. Penanaman pohon-pohon endemik dan penghijauan di daerah tangkapan air bertujuan untuk mengurangi erosi tanah, memperbaiki kualitas tanah, serta menjaga kestabilan aliran air selama musim hujan.
- 6) **Pemulihan Habitat dan Pengelolaan Sumber Daya Alam:** Pemulihan habitat alami di sepanjang Sungai Ciliwung juga menjadi fokus utama proyek ini.
- 7) **Peningkatan Infrastruktur dan Pengelolaan Sumber Daya Air:** Selain perbaikan kualitas air, proyek restorasi Sungai Ciliwung juga melibatkan pembangunan dan pemeliharaan infrastruktur pengelolaan air yang lebih efisien.
- 8) **Partisipasi Masyarakat dan Pendidikan Lingkungan:** Keterlibatan masyarakat dalam proyek restorasi ini sangat penting untuk memastikan keberlanjutan dan keberhasilan program. Oleh karena itu, proyek ini tidak hanya mencakup aspek teknis restorasi, tetapi juga aspek edukasi dan pemberdayaan masyarakat.

c. Hasil dan Dampak

Proyek ini telah menunjukkan hasil yang positif, di antaranya:

- 1) **Pengurangan banjir:** Penanaman vegetasi riparian membantu memperlambat aliran air selama musim hujan, mengurangi risiko banjir di hilir.
- 2) **Peningkatan kualitas air:** Kadar bahan pencemar seperti limbah domestik dan plastik menurun signifikan dalam lima tahun terakhir (Iskandar et al., 2019).
- 3) **Pemulihan habitat:** Kembalinya spesies lokal, seperti ikan dan burung, menunjukkan pemulihan ekosistem sungai.

- 4) **Peningkatan Partisipasi Masyarakat:** Melalui program edukasi dan pelibatan masyarakat dalam restorasi dan pengelolaan sungai, masyarakat setempat menjadi lebih sadar akan pentingnya menjaga kebersihan sungai dan kelestarian lingkungan.
- 5) **Dampak Ekonomi Positif:** Dengan terciptanya lingkungan yang lebih bersih dan sehat, serta adanya potensi ekowisata yang berkembang di sekitar sungai, masyarakat setempat memperoleh peluang baru dalam sektor ekonomi.
- 6) **Pemulihan Ekosistem Pesisir:** Pengelolaan wilayah pesisir yang lebih baik telah berhasil memulihkan beberapa ekosistem pesisir, seperti mangrove, yang berfungsi sebagai penahan abrasi dan tempat tinggal bagi berbagai spesies.

d. Tantangan

Namun, tantangan seperti urbanisasi yang terus berkembang dan rendahnya partisipasi masyarakat dalam pengelolaan jangka panjang masih memerlukan perhatian lebih lanjut (Sari et al., 2021). Meskipun proyek restorasi Sungai Ciliwung berbasis jasa ekosistem telah menunjukkan berbagai hasil yang positif, masih terdapat sejumlah tantangan yang perlu dihadapi untuk mencapai keberlanjutan pengelolaan sumber daya alam ini. Tantangan pertama adalah kurangnya kesadaran dan partisipasi masyarakat. Meskipun telah dilakukan berbagai upaya edukasi, sebagian besar masyarakat yang tinggal di sekitar sungai masih belum sepenuhnya menyadari pentingnya menjaga ekosistem sungai dan pesisir. Sebagian besar penduduk masih terbiasa membuang sampah sembarangan ke sungai dan tidak mematuhi regulasi mengenai pembuangan limbah. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang lebih komprehensif dan berkelanjutan dalam meningkatkan kesadaran dan mendorong partisipasi aktif masyarakat dalam kegiatan restorasi dan pengelolaan sumber daya alam (UNEP, 2011).

Tantangan kedua adalah konflik antara pengelolaan lingkungan dan kepentingan ekonomi. Aktivitas perindustrian dan urbanisasi yang terus berkembang di sepanjang Sungai Ciliwung menyebabkan tekanan yang sangat besar terhadap lingkungan. Pembangunan infrastruktur yang tidak terkelola dengan baik seringkali merusak ekosistem sungai dan pesisir. Di sisi lain, kebutuhan ekonomi masyarakat yang bergantung pada pemanfaatan sungai dan pesisir untuk kegiatan industri, pertanian, dan pemukiman memerlukan solusi yang seimbang antara pemulihan ekosistem dan pengembangan ekonomi. Untuk itu, diperlukan perencanaan yang lebih matang dan kebijakan yang mengintegrasikan kepentingan lingkungan dan ekonomi dalam pengelolaan sungai dan wilayah pesisir (Barbier, 2007).

2. Penggunaan Hutan Mangrove untuk Pengendalian Erosi dan Banjir di Wilayah Pesisir

a. Latar Belakang

Hutan mangrove adalah salah satu ekosistem pesisir paling penting yang menyediakan berbagai jasa ekosistem, termasuk pengendalian erosi, mitigasi banjir, dan perlindungan pantai dari badai. Namun, konversi hutan mangrove untuk tambak, pertanian, dan pembangunan pesisir telah menyebabkan degradasi ekosistem ini secara global. Di tengah ancaman tersebut, konservasi dan restorasi hutan mangrove menjadi solusi yang semakin relevan. Mengembalikan keberadaan hutan mangrove di wilayah pesisir dapat mengurangi potensi kerusakan akibat erosi dan banjir. Program restorasi mangrove di berbagai negara kini menjadi bagian penting dari upaya mitigasi perubahan iklim dan perlindungan terhadap masyarakat pesisir. Melalui upaya ini, masyarakat tidak hanya mendapatkan manfaat ekologis dalam bentuk pengurangan bencana, tetapi juga dapat memanfaatkan hasil hutan mangrove untuk peningkatan ekonomi, seperti ekowisata, perikanan, dan produk-produk berbasis hutan lainnya.

Oleh karena itu, pengelolaan yang berkelanjutan terhadap hutan mangrove sangat penting untuk memastikan kelestarian ekosistem pesisir yang sehat dan meningkatkan ketahanan terhadap perubahan iklim.

b. Studi Kasus: Restorasi Mangrove di Demak, Indonesia

Proyek restorasi mangrove di Demak, Jawa Tengah, adalah contoh sukses penggunaan jasa ekosistem mangrove untuk pengendalian erosi dan banjir. Daerah ini sebelumnya mengalami abrasi parah yang mengakibatkan hilangnya lahan hingga ratusan hektar. Demak, yang terletak di pesisir utara Jawa Tengah, Indonesia, merupakan daerah yang terkenal dengan ekosistem mangrove yang luas. Namun, dalam beberapa dekade terakhir, daerah ini mengalami kerusakan yang cukup signifikan pada hutan mangrovenya. Konversi lahan untuk pertanian, pemukiman, dan pembangunan infrastruktur telah mengurangi luas hutan mangrove, sementara perubahan iklim dan kenaikan permukaan air laut juga menambah beban ekosistem pesisir ini

Intervensi utama yang dilakukan meliputi:

- 1) **Penanaman mangrove:** Sekitar 100 hektar mangrove ditanam kembali untuk memperkuat perlindungan pesisir.
- 2) **Instalasi pemecah gelombang berbasis bambu:** Struktur ini membantu mengurangi kecepatan gelombang, memungkinkan endapan sedimen dan pertumbuhan mangrove yang lebih baik.
- 3) **Pemberdayaan masyarakat:** Melibatkan penduduk lokal dalam perawatan mangrove dan edukasi tentang manfaat ekosistem mangrove.
- 4) **Pembangunan Infrastruktur Pengendali Erosi:** Selain penanaman mangrove, proyek restorasi ini juga mencakup pembangunan infrastruktur pengendali erosi, seperti pemasangan bambu dan jaring untuk memperkuat tanah di sekitar daerah mangrove.

- 5) **Pemberdayaan Masyarakat Lokal:** Salah satu aspek penting dari intervensi ini adalah **pemberdayaan masyarakat lokal** yang berperan dalam menjaga kelestarian mangrove dan mengembangkan alternatif ekonomi berbasis ekosistem.

c. Hasil dan Dampak

Proyek ini telah berhasil mengurangi abrasi dan memberikan manfaat tambahan:

- 1) **Pengendalian erosi:** Tingkat abrasi menurun secara signifikan, dengan garis pantai yang stabil kembali dalam lima tahun terakhir (Friess et al., 2019).
- 2) **Perlindungan terhadap banjir:** Hutan mangrove bertindak sebagai penghalang alami yang menyerap energi gelombang selama badai, melindungi desa pesisir dari banjir.
- 3) **Manfaat ekonomi:** Hutan mangrove menyediakan sumber daya tambahan bagi masyarakat, seperti kayu, kepiting, dan ikan.
- 4) **Peningkatan Ketahanan Terhadap Banjir:** Selain mengurangi erosi, restorasi mangrove juga memberikan dampak positif dalam **meningkatkan ketahanan terhadap banjir** di daerah pesisir Demak.
- 5) **Manfaat Sosial-Ekonomi bagi Masyarakat Lokal:** Salah satu dampak yang sangat signifikan dari proyek ini adalah peningkatan kesejahteraan masyarakat setempat.
- 6) **Pengurangan Abrasi dan Erosi Pantai:** Salah satu hasil yang paling mencolok dari proyek ini adalah **berkurangnya abrasi dan erosi pantai** di sepanjang pesisir Demak.

d. Tantangan

- 1) **Pendanaan:** Keterbatasan anggaran sering menjadi kendala untuk menjaga kesinambungan proyek.
- 2) **Perubahan iklim:** Kenaikan permukaan laut tetap menjadi ancaman yang harus dikelola melalui strategi adaptasi tambahan.

- 3) **Konversi Lahan dan Aktivitas Manusia: Konversi lahan untuk pertanian, pemukiman, dan pembangunan infrastruktur** di sepanjang pesisir Demak menjadi tantangan besar dalam upaya restorasi mangrove.
- 4) **Pendanaan dan Dukungan Institusional: Pendanaan yang tidak memadai dan kurangnya dukungan institusional** menjadi tantangan yang signifikan dalam menjaga keberlanjutan restorasi mangrove.

3. Manfaat Integrasi Jasa Ekosistem dalam Studi Kasus Ini

a. Peningkatan Ketahanan Lingkungan

Kedua studi kasus menunjukkan bahwa pendekatan berbasis ekosistem meningkatkan ketahanan lingkungan terhadap bencana:

- 1) Restorasi Sungai Ciliwung mengurangi risiko banjir dan memperbaiki kualitas air.
- 2) Restorasi Mangrove di Demak: Dalam konteks restorasi mangrove di Demak, keberadaan mangrove yang sehat berperan sebagai pelindung alami yang efektif terhadap gelombang pasang, erosi, dan badai. Akar-akar mangrove yang kuat menyaring sedimen dan memperkuat tanah, sehingga mengurangi laju erosi pantai dan memperlambat arus air yang dapat menyebabkan banjir.
- 3) Pengelolaan Sungai Berbasis Jasa Ekosistem: Pada studi kasus pengelolaan sungai berbasis jasa ekosistem, proyek-proyek restorasi sungai juga terbukti mampu mengurangi kerusakan yang disebabkan oleh bencana banjir dan erosi di sepanjang sungai. Pendekatan berbasis ekosistem seperti penghijauan daerah tangkapan air, pengelolaan rawa, dan pemulihan ekosistem aliran sungai membantu mengatur aliran air dan memperbaiki kemampuan ekosistem untuk menyerap kelebihan air saat hujan lebat.

- 4) **Pengelolaan Terpadu dan Masyarakat Lokal:** Pendekatan berbasis ekosistem juga menekankan pentingnya peran serta masyarakat lokal dalam pengelolaan sumber daya alam, terutama dalam konteks restorasi mangrove dan pengelolaan sungai. Melalui partisipasi aktif masyarakat dalam kegiatan restorasi dan pemantauan, keberlanjutan proyek dapat terjamin.
- 5) **Keberlanjutan Jangka Panjang:** Untuk mencapai ketahanan lingkungan yang berkelanjutan, pendekatan berbasis ekosistem harus diterapkan dengan perencanaan jangka panjang dan perhatian terhadap aspek pemeliharaan.

b. Dukungan Keberlanjutan Ekologis

Dengan memulihkan fungsi alami sungai dan pesisir, keanekaragaman hayati dipertahankan:

- 1) Sungai Ciliwung menunjukkan peningkatan populasi spesies ikan dan burung.
- 2) Hutan mangrove di Demak menjadi habitat penting bagi berbagai spesies flora dan fauna pesisir.
- 3) **Penyediaan Habitat yang Stabil:** Sungai dan pesisir yang sehat menyediakan habitat yang stabil bagi berbagai spesies. Misalnya, ekosistem mangrove yang dipulihkan memberikan tempat berkembang biak yang aman bagi ikan dan spesies akuatik lainnya.
- 4) **Perlindungan Terhadap Keanekaragaman Spesies:** Ekosistem yang sehat, seperti hutan mangrove dan terumbu karang, berfungsi sebagai pelindung alami dari erosi dan badai, yang secara langsung mempengaruhi kelangsungan hidup spesies yang tinggal di wilayah pesisir.
- 5) **Peningkatan Kualitas Air:** Restorasi sungai yang mencakup penghijauan di sepanjang daerah tangkapan air dan pengelolaan lahan basah dapat meningkatkan kualitas air yang mengalir ke sungai dan pesisir.

c. Manfaat Sosial dan Ekonomi

Pendekatan ini juga memberikan manfaat langsung kepada masyarakat lokal:

- 1) Di Ciliwung, masyarakat menikmati air yang lebih bersih dan lingkungan yang lebih sehat.
- 2) Di Demak, hutan mangrove mendukung penghidupan melalui perikanan dan pariwisata berbasis alam.
- 3) Peningkatan kesejahteraan masyarakat lokal. Salah satu manfaatnya utama pengelolaan berbasis jasa ekosistem adalah peningkatan kesejahteraan sosial bagi masyarakat yang tinggal di sekitar ekosistem yang dipulihkan.
- 4) penciptaan lapangan pekerjaan dan pendapatan. Dengan mengembalikan fungsi ekosistem pesisir dan sungai, proyek-proyek berbasis jasa ekosistem juga menciptakan lapangan pekerjaan baru.
- 5) pengurangan resiko bencana dan perlindungan infrastruktur, Pengelolaan ekosistem yang sehat, seperti restorasi mangrove dan hutan pesisir, berperan penting dalam mengurangi risiko bencana alam. Mangrove, sebagai contoh, bertindak sebagai penahan gelombang yang dapat mengurangi dampak badai tropis dan tsunami.

Kesimpulan

Studi kasus restorasi Sungai Ciliwung dan penggunaan mangrove di Demak menunjukkan bagaimana integrasi jasa ekosistem dalam pengelolaan lingkungan dapat memberikan solusi berkelanjutan untuk mengatasi degradasi ekosistem dan risiko bencana. Pendekatan berbasis ekosistem tidak hanya memperkuat fungsi ekologis tetapi juga mendukung kesejahteraan sosial dan ekonomi masyarakat. Meskipun menghadapi tantangan, keberhasilan ini menunjukkan potensi besar untuk diadopsi dalam skala yang lebih luas. Pengelolaan sungai dan wilayah pesisir berbasis jasa ekosistem merupakan pendekatan yang holistik dan berkelanjutan untuk menjaga dan memulihkan fungsi alam yang sangat penting bagi kehidupan manusia dan ekosistem itu sendiri.

Melalui pemulihan ekosistem alami, seperti mangrove dan sungai, kita tidak hanya melestarikan keanekaragaman hayati, tetapi juga memberikan manfaat sosial dan ekonomi yang besar bagi masyarakat lokal. Proyek restorasi mangrove, misalnya, telah berhasil mengurangi erosi, meningkatkan hasil perikanan, dan memberikan perlindungan terhadap bencana alam, sekaligus menciptakan peluang ekonomi baru bagi masyarakat setempat.

Pendekatan berbasis jasa ekosistem ini juga memberikan dukungan terhadap keberlanjutan ekologis, dengan memastikan bahwa ekosistem yang dipulihkan dapat bertahan dan terus memberikan manfaat dalam jangka panjang. Melibatkan masyarakat lokal dalam proses pemulihan ekosistem sangat penting, karena mereka memiliki pengetahuan yang berharga dan dapat memperkuat ketahanan terhadap ancaman lingkungan. Keberhasilan pengelolaan berbasis jasa ekosistem bukan hanya terletak pada perbaikan fungsi ekologis, tetapi juga pada peningkatan kualitas hidup masyarakat dan ketahanan terhadap perubahan iklim.

Secara keseluruhan, pengelolaan berbasis jasa ekosistem mengintegrasikan berbagai aspek ekologis, sosial, dan ekonomi untuk menciptakan solusi yang lebih berkelanjutan dan adil. Keberhasilan proyek-proyek restorasi sungai dan pesisir yang berbasis pada jasa ekosistem memberikan harapan bahwa pemulihan alam dan pembangunan ekonomi dapat berjalan seiring, membawa manfaat bagi semua pihak, dan mendukung ketahanan lingkungan serta masyarakat untuk menghadapi tantangan di masa depan.

Tantangan dalam Mengintegrasikan Jasa Ekosistem

Pengintegrasian jasa ekosistem dalam pengelolaan lingkungan dan pembangunan menjadi hal yang semakin penting untuk mendukung keberlanjutan ekologi dan sosial. Namun, proses ini menghadapi sejumlah tantangan signifikan. Artikel ini menguraikan tiga tantangan utama dalam mengintegrasikan jasa ekosistem, yaitu konflik kepentingan antara pembangunan infrastruktur dan pelestarian ekosistem, kurangnya data dan pemahaman tentang nilai ekonomi jasa ekosistem, serta

keterbatasan regulasi dan kebijakan yang mendukung pendekatan berbasis ekosistem.

Tantangan lain yang perlu diperhatikan adalah keterbatasan kapasitas sumber daya manusia yang terampil dalam mengintegrasikan konsep jasa ekosistem ke dalam kebijakan dan perencanaan pembangunan. Banyak pemangku kepentingan, termasuk perencana kota dan pembuat kebijakan, masih memiliki pemahaman yang terbatas tentang pentingnya jasa ekosistem dalam mendukung keberlanjutan. Akibatnya, pendekatan yang digunakan dalam perencanaan sering kali tidak mempertimbangkan nilai jasa ekosistem, sehingga mengarah pada pengambilan keputusan yang berisiko tinggi terhadap lingkungan. Untuk mengatasi tantangan ini, diperlukan program pelatihan dan pendidikan yang berfokus pada pengembangan keahlian teknis dan kesadaran tentang pentingnya jasa ekosistem.

Selain itu, kurangnya kolaborasi antar sektor juga menjadi hambatan dalam pengintegrasian jasa ekosistem. Banyak sektor, seperti pertanian, kehutanan, perikanan, dan infrastruktur, bekerja secara terpisah tanpa ada koordinasi yang memadai untuk mempertimbangkan dampaknya terhadap ekosistem. Pendekatan yang terfragmentasi ini tidak hanya mengurangi efektivitas kebijakan, tetapi juga meningkatkan risiko terjadinya degradasi lingkungan. Untuk itu, diperlukan kerangka kerja yang mendorong kolaborasi lintas sektor, dengan melibatkan berbagai pemangku kepentingan, termasuk pemerintah, masyarakat, akademisi, dan sektor swasta, dalam merancang kebijakan berbasis ekosistem.

1. Konflik Kepentingan antara Pembangunan Infrastruktur dan Pelestarian Ekosistem

a. Latar Belakang

Pembangunan infrastruktur sering kali bertentangan dengan tujuan pelestarian ekosistem. Infrastruktur seperti bendungan, jalan, dan kawasan industri membutuhkan lahan yang sering kali diambil dari area ekosistem alami, seperti hutan, lahan basah, dan bantaran sungai.

Ekosistem menyediakan berbagai jasa yang mendukung kehidupan manusia dan keberlanjutan planet, seperti pengendalian erosi, penyimpanan karbon, serta habitat

bagi keanekaragaman hayati. Namun, tekanan dari pertumbuhan populasi dan peningkatan kebutuhan pembangunan telah menyebabkan eksploitasi sumber daya alam secara besar-besaran. Akibatnya, banyak ekosistem alami yang terganggu atau bahkan hilang.

Pembangunan infrastruktur menjadi salah satu pendorong utama hilangnya ekosistem. Infrastruktur seperti jalan, bendungan, dan kawasan industri sering kali dibangun di atas lahan yang sebelumnya merupakan ekosistem alami. Fenomena ini menimbulkan konflik antara kebutuhan pembangunan dan pelestarian ekosistem, yang pada akhirnya berdampak pada keberlanjutan lingkungan dan kesejahteraan masyarakat.

Pentingnya pengintegrasian jasa ekosistem ke dalam perencanaan pembangunan menjadi semakin diakui. Konsep ini bertujuan untuk memastikan bahwa manfaat ekosistem tetap dapat dinikmati oleh generasi mendatang tanpa mengorbankan kebutuhan pembangunan saat ini. Dengan demikian, diperlukan upaya yang terkoordinasi untuk menyeimbangkan kepentingan pembangunan dan pelestarian.

b. Dampak Konflik

- 1) Kerusakan ekosistem:** Pembangunan infrastruktur dapat mengakibatkan degradasi lingkungan, termasuk hilangnya habitat dan berkurangnya fungsi ekologis, seperti pengendalian banjir dan penyediaan air bersih. Hal ini juga dapat memengaruhi spesies endemik yang bergantung pada habitat tersebut untuk bertahan hidup.
- 2) Pemutusan konektivitas ekosistem:** Bendungan dan infrastruktur lainnya sering kali memutus aliran alami sungai, menghambat migrasi ikan dan proses sedimentasi (Grill et al., 2019). Akibatnya, siklus hidup banyak spesies air tawar terganggu, yang pada gilirannya memengaruhi ekosistem yang lebih luas.

3) Ketidakpuasan masyarakat lokal: Pembangunan infrastruktur yang tidak mempertimbangkan dampak ekosistem sering kali memicu konflik sosial, terutama jika masyarakat kehilangan akses terhadap sumber daya alami. Kondisi ini dapat memicu protes, perpindahan penduduk, dan hilangnya mata pencaharian tradisional.

c. Studi Kasus

Proyek pembangunan bendungan di Sungai Mekong telah menimbulkan dampak signifikan pada ekosistem sungai dan masyarakat lokal. Ekosistem sungai yang terganggu menyebabkan penurunan populasi ikan dan hilangnya lahan subur akibat perubahan pola aliran air (Sabo et al., 2017).

Di Amazon, deforestasi untuk pembangunan jalan dan area pertanian telah menyebabkan hilangnya ekosistem hutan hujan tropis yang mendukung keanekaragaman hayati dunia. Penelitian menunjukkan bahwa fragmentasi habitat akibat pembangunan infrastruktur ini mengurangi populasi spesies kunci dan meningkatkan risiko kepunahan (Laurance et al., 2018).

Selain itu, di Afrika Timur, proyek pembangunan saluran pipa minyak di Kenya telah menimbulkan kontroversi karena dampaknya terhadap Taman Nasional Tsavo. Infrastruktur ini tidak hanya mengancam satwa liar seperti gajah dan singa tetapi juga memengaruhi sumber pendapatan masyarakat lokal yang bergantung pada pariwisata berbasis ekowisata (WWF, 2020).

d. Solusi

1) Pendekatan berbasis ekosistem dalam desain infrastruktur: Kombinasi antara infrastruktur abu-abu dan hijau dapat mengurangi dampak negatif terhadap ekosistem. Infrastruktur hijau, seperti hutan kota, lahan basah buatan, dan koridor hijau, mampu menjaga fungsi ekosistem sembari mendukung kebutuhan pembangunan. Pendekatan ini juga dapat meningkatkan kualitas hidup masyarakat dengan

menyediakan ruang terbuka hijau yang multifungsi. Kolaborasi antara perencana kota, ilmuwan lingkungan, dan masyarakat lokal sangat penting untuk memastikan keberhasilan desain ini. Mengombinasikan infrastruktur abu-abu dengan infrastruktur hijau dapat meminimalkan dampak negatif terhadap ekosistem.

- 2) Partisipasi masyarakat lokal:** Melibatkan komunitas dalam perencanaan proyek untuk memastikan keseimbangan antara pembangunan dan pelestarian. Memberikan pelatihan kepada pembuat kebijakan tentang pentingnya jasa ekosistem dan metode valuasinya. Melibatkan komunitas dalam perencanaan proyek untuk memastikan keseimbangan antara pembangunan dan pelestarian ekosistem. Komunitas lokal memiliki pengetahuan tradisional yang berharga mengenai ekosistem setempat, yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi solusi yang sesuai dengan kondisi lokal. Selain itu, partisipasi aktif mereka dapat meningkatkan rasa memiliki dan mendukung keberlanjutan jangka panjang proyek. Edukasi dan sosialisasi mengenai manfaat ekosistem juga diperlukan untuk meningkatkan keterlibatan masyarakat dalam pengambilan keputusan. Melibatkan komunitas dalam perencanaan proyek untuk memastikan keseimbangan antara pembangunan dan pelestarian ekosistem.

2. Kurangnya Data dan Pemahaman tentang Nilai Ekonomi Jasa Ekosistem

a. Latar Belakang

Jasa ekosistem merupakan elemen yang tidak dapat dipisahkan dari kesejahteraan manusia dan keberlanjutan lingkungan. Namun, sering kali jasa ini diabaikan dalam pengambilan keputusan karena kurangnya pemahaman yang memadai. Hal ini menyebabkan pengelolaan sumber daya alam lebih sering berfokus pada keuntungan ekonomi

jangka pendek, tanpa mempertimbangkan dampak jangka panjang terhadap lingkungan.

Selain itu, pengukuran nilai jasa ekosistem sering kali menghadapi tantangan metodologis. Tidak semua jasa ekosistem memiliki nilai pasar yang jelas, sehingga sulit untuk dihitung dalam analisis ekonomi tradisional. Akibatnya, manfaat-manfaat seperti penyimpanan karbon, pengaturan siklus air, dan keanekaragaman hayati cenderung diabaikan.

Di banyak negara berkembang, termasuk Indonesia, kesenjangan data menjadi salah satu hambatan utama dalam memahami nilai ekonomi jasa ekosistem. Data yang tersedia sering kali terbatas, terfragmentasi, dan tidak mencerminkan kondisi ekosistem secara holistik. Kekurangan ini semakin memperburuk ketidakmampuan untuk membuat keputusan berbasis bukti yang dapat mendukung pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan.

Untuk mengatasi tantangan ini, diperlukan integrasi lintas sektor yang melibatkan pemerintah, akademisi, sektor swasta, dan masyarakat. Kolaborasi ini dapat membantu menghasilkan data yang lebih lengkap, memperbaiki metodologi valuasi, dan meningkatkan kesadaran tentang pentingnya jasa ekosistem dalam pembangunan ekonomi dan sosial.

Jasa ekosistem memiliki nilai ekonomi yang sering kali tidak terlihat atau diabaikan dalam pengambilan keputusan. Penilaian ekonomi yang tidak memadai membuat manfaat ekosistem dianggap kurang penting dibandingkan keuntungan langsung dari pembangunan infrastruktur.

b. Dampak

1) Pengabaian jasa ekosistem dalam perencanaan:

Tanpa data yang memadai, fungsi ekosistem seperti pengendalian banjir, penyediaan air bersih, dan habitat bagi keanekaragaman hayati sering kali diabaikan dalam analisis biaya-manfaat proyek. Tanpa data yang memadai, keputusan pembangunan cenderung

mengutamakan keuntungan ekonomi jangka pendek, sementara dampak negatif terhadap lingkungan diabaikan. Hal ini mengurangi kemampuan ekosistem untuk memberikan layanan yang vital bagi manusia, seperti perlindungan dari bencana alam dan pengendalian erosi.

- 2) **Kerugian jangka panjang:** Hilangnya ekosistem dapat menghasilkan kerugian ekonomi yang lebih besar dibandingkan dengan keuntungan jangka pendek dari pembangunan. Dampak ini sering kali terlihat dalam bentuk peningkatan biaya mitigasi bencana, seperti banjir dan longsor, serta penurunan kualitas hidup masyarakat yang kehilangan akses terhadap sumber daya alam yang berkelanjutan.

c. **Studi Kasus**

Proyek reklamasi lahan di Teluk Jakarta menunjukkan bagaimana pengabaian jasa ekosistem pesisir, seperti hutan mangrove dan lahan basah, berkontribusi pada peningkatan risiko banjir dan erosi pantai. Analisis retrospektif menunjukkan bahwa nilai ekonomi jasa ekosistem yang hilang jauh melebihi biaya pembangunan reklamasi (Lestari et al., 2021).

Dampak dari reklamasi lahan di Teluk Jakarta juga tercermin pada kualitas air dan keberagaman hayati. Pembangunan reklamasi menyebabkan perubahan besar pada aliran air dan sedimentasi, yang mempengaruhi kualitas air di sekitar kawasan tersebut. Ini mengakibatkan penurunan kualitas hidup bagi komunitas lokal yang bergantung pada sumber daya alam untuk mata pencaharian mereka, seperti nelayan dan petani garam. Oleh karena itu, penting untuk melibatkan masyarakat lokal dalam setiap keputusan perencanaan reklamasi guna memastikan bahwa keberlanjutan ekosistem dan ekonomi lokal dapat terjaga.

Terakhir, proyek reklamasi ini mengilustrasikan pentingnya pendekatan berbasis ekosistem dalam perencanaan pembangunan pesisir. Pengintegrasian jasa

ekosistem dalam perencanaan dan kebijakan pembangunan akan memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai biaya dan manfaat jangka panjang, serta mengurangi potensi kerugian ekonomi dan lingkungan. Oleh karena itu, pelibatan para ahli ekologi, perencana kota, dan masyarakat lokal sangat diperlukan untuk merumuskan kebijakan yang memperhatikan keberlanjutan alam dan kesejahteraan masyarakat.

d. Solusi

- 1) Penelitian dan pengembangan alat valuasi ekonomi:** Metode seperti analisis penggantian biaya (*replacement cost analysis*) dan penilaian kontinjensi (*contingent valuation*) dapat digunakan untuk mengukur nilai ekonomi jasa ekosistem. Pendekatan ini memungkinkan penentuan nilai ekonomi yang lebih objektif dari jasa yang diberikan oleh ekosistem pesisir, seperti perlindungan pantai dari erosi, penyediaan habitat bagi spesies laut, dan penyerapan karbon. Dengan menggunakan alat ini, kita dapat menghasilkan data yang lebih komprehensif tentang kontribusi ekosistem terhadap kesejahteraan manusia, yang pada gilirannya dapat digunakan untuk mendukung kebijakan pembangunan yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.
- 2) Peningkatan kapasitas:** Pelatihan bagi pembuat kebijakan dan perencana proyek tentang pentingnya jasa ekosistem dan cara menghitung nilainya. Dengan pengetahuan yang lebih baik tentang valuasi ekonomi ekosistem, para pengambil keputusan dapat merancang kebijakan yang mengutamakan pelestarian ekosistem pesisir dan meminimalkan kerugian ekonomi jangka panjang. Program pelatihan ini juga dapat mencakup penerapan metode-metode ilmiah terbaru untuk menilai dan memitigasi dampak proyek pembangunan terhadap ekosistem.

3. Keterbatasan Regulasi dan Kebijakan yang Mendukung Pendekatan Berbasis Ekosistem

a. Latar Belakang

Kebijakan dan regulasi yang mendukung pendekatan berbasis ekosistem sering kali masih terbatas, baik dalam jumlah maupun pelaksanaannya. Kurangnya kerangka hukum yang kuat menghambat implementasi pendekatan berbasis ekosistem secara luas. Selain itu, meskipun terdapat beberapa peraturan yang mengatur perlindungan lingkungan, banyak di antaranya yang tidak secara eksplisit mengintegrasikan nilai dan pentingnya jasa ekosistem dalam perencanaan pembangunan. Hal ini sering kali disebabkan oleh kurangnya pemahaman mengenai pentingnya jasa ekosistem serta tantangan dalam mengukur dan mengomunikasikan manfaat jangka panjang yang mereka berikan. Di sisi lain, ketidaksesuaian antara kebijakan pembangunan dan konservasi sering menyebabkan pengabaian terhadap keberlanjutan ekosistem dalam proses perencanaan pembangunan, yang memperburuk kerusakan lingkungan.

Lebih lanjut, implementasi kebijakan berbasis ekosistem sering kali terhambat oleh adanya fragmentasi dalam struktur pemerintahan dan kelembagaan. Beberapa instansi pemerintah memiliki kewenangan yang tumpang tindih dalam pengelolaan sumber daya alam dan lingkungan, yang menyebabkan kebijakan yang diterapkan tidak terkoordinasi dengan baik. Kurangnya sinergi antara sektor-sektor yang terkait, seperti sektor pertanian, perikanan, dan kehutanan, dapat memperburuk dampak negatif terhadap ekosistem. Hal ini menambah tantangan dalam mengintegrasikan pendekatan berbasis ekosistem yang holistik dan efektif dalam perencanaan pembangunan. Tantangan lain yang dihadapi dalam pengembangan kebijakan berbasis ekosistem adalah minimnya data yang tersedia untuk mendukung perumusan kebijakan tersebut. Informasi terkait kondisi ekosistem, perubahan yang terjadi, dan potensi dampak jangka panjang sering kali sulit

diakses atau tidak terperinci. Tanpa data yang akurat dan terkini, pembuat kebijakan kesulitan untuk membuat keputusan yang berdasarkan bukti yang solid. Selain itu, kurangnya sumber daya manusia yang terlatih dalam analisis ekosistem dan valuasi ekonomi juga menjadi penghalang dalam merumuskan kebijakan yang efektif dan berbasis pada prinsip keberlanjutan.

b. Dampak

1) Kurangnya insentif untuk pelestarian: Tanpa kebijakan yang jelas, pemerintah dan sektor swasta sering kali lebih memilih pendekatan tradisional yang lebih cepat tetapi merusak ekosistem. Keputusan ini sering didorong oleh kepentingan ekonomi jangka pendek yang mengutamakan keuntungan instan, seperti pembangunan infrastruktur yang tidak mempertimbangkan dampak lingkungan. Akibatnya, banyak proyek yang menimbulkan kerusakan permanen pada ekosistem pesisir, hutan, dan lahan basah, yang seharusnya bisa berfungsi sebagai penyangga alam yang penting. Tanpa insentif yang kuat, seperti insentif fiskal atau kemudahan perizinan bagi pelestarian ekosistem, sektor swasta cenderung lebih memilih untuk mengabaikan prinsip keberlanjutan.

2) Kegagalan dalam penegakan hukum: Dalam banyak kasus, regulasi yang ada tidak ditegakkan dengan baik, sehingga proyek pembangunan yang merusak ekosistem tetap berlangsung. Lemahnya penegakan hukum sering kali disebabkan oleh kurangnya sumber daya yang dialokasikan untuk pengawasan, ketidakjelasan dalam pembagian kewenangan antara instansi, dan kurangnya transparansi dalam proses perizinan. Hal ini memungkinkan aktor yang tidak bertanggung jawab untuk mengeksploitasi sumber daya alam secara berlebihan tanpa mempertimbangkan dampaknya terhadap lingkungan. Selain itu, kurangnya sanksi yang efektif bagi pelanggar

regulasi membuat peraturan lingkungan sering kali dianggap sebagai aturan yang bisa diabaikan, yang akhirnya menyebabkan kerusakan ekosistem yang lebih parah.

c. Studi Kasus

Di beberapa negara berkembang, seperti Indonesia, pelaksanaan kebijakan zonasi pesisir sering kali tidak konsisten. Hal ini menyebabkan konversi lahan mangrove menjadi tambak atau kawasan industri tanpa mempertimbangkan dampak jangka panjang terhadap ekosistem pesisir (Primavera et al., 2019). Ketidaksesuaian antara perencanaan ruang dan kebijakan pelestarian lingkungan sering kali mendorong pemanfaatan lahan pesisir untuk kegiatan ekonomi yang merusak, seperti pembangunan industri, pertanian, dan perikanan yang tidak berkelanjutan. Dalam banyak kasus, kebijakan zonasi yang diterapkan kurang memperhitungkan nilai ekologis dan ekonomi dari ekosistem pesisir yang seharusnya dilindungi.

Sebagai contoh, konversi lahan mangrove di pesisir utara Jawa telah menyebabkan hilangnya habitat bagi berbagai spesies laut dan penurunan kualitas air yang drastis. Mangrove, yang berfungsi sebagai penahan abrasi dan perlindungan terhadap banjir, telah digantikan dengan tambak dan kawasan industri yang menambah beban pada ekosistem pesisir. Meskipun ada beberapa upaya untuk memperkenalkan program restorasi mangrove, seperti yang dilakukan oleh beberapa LSM dan masyarakat lokal, keberhasilan jangka panjang sangat terbatas jika kebijakan zonasi pesisir tidak diubah dan dilaksanakan secara konsisten.

Selain itu, ketidakjelasan dalam implementasi kebijakan zonasi sering kali diperburuk oleh kurangnya koordinasi antara berbagai instansi pemerintah. Pengawasan yang lemah, minimnya komunikasi antar pemerintah daerah dan pusat, serta ketidaksesuaian antara regulasi sektoral yang ada menghambat keberhasilan kebijakan zonasi pesisir. Di

beberapa kasus, proyek pembangunan yang merusak ekosistem berjalan karena kurangnya pengawasan yang memadai atau bahkan karena adanya dorongan ekonomi dari sektor swasta yang memiliki pengaruh besar. Dalam hal ini, pendekatan yang lebih holistik dan berbasis ekosistem diperlukan agar kebijakan zonasi pesisir dapat lebih efektif dalam melindungi lingkungan dan kesejahteraan masyarakat pesisir.

d. Solusi

1) Peningkatan kebijakan berbasis ekosistem:

Membuat kebijakan yang mewajibkan analisis dampak lingkungan berbasis jasa ekosistem dapat membantu memastikan bahwa setiap proyek pembangunan mempertimbangkan dengan cermat manfaat yang diberikan oleh ekosistem terhadap masyarakat dan lingkungan. Dengan memasukkan analisis ini dalam setiap tahap perencanaan, mulai dari perencanaan awal hingga implementasi, pemerintah dapat mengidentifikasi dan memitigasi potensi kerusakan ekologis sebelum proyek dimulai. Hal ini juga akan mendorong integrasi nilai ekosistem dalam keputusan kebijakan, sehingga mendorong pembangunan yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

2) Insentif untuk pelestarian: Memberikan penghargaan atau subsidi kepada proyek yang mendukung pelestarian ekosistem merupakan langkah penting untuk mendorong sektor swasta dan masyarakat untuk berinvestasi dalam kegiatan konservasi. Insentif ini dapat berupa pengurangan pajak, pendanaan untuk proyek restorasi ekosistem, atau kemudahan dalam perizinan bagi inisiatif yang berfokus pada pelestarian alam. Dengan memberikan insentif yang menarik, sektor swasta akan lebih terdorong untuk melakukan kegiatan yang tidak hanya menguntungkan secara finansial tetapi juga mendukung keberlanjutan lingkungan.

3) Kolaborasi internasional: Belajar dari negara-negara yang telah berhasil menerapkan pendekatan berbasis ekosistem, seperti Belanda dengan program perlindungan pesisir berbasis mangrove. Negara-negara ini telah mengembangkan sistem perlindungan pesisir yang menggabungkan keberlanjutan ekosistem dengan perlindungan terhadap infrastruktur dan masyarakat pesisir. Kolaborasi internasional memungkinkan pertukaran pengetahuan, teknologi, dan praktik terbaik yang dapat diadaptasi dengan konteks lokal, sehingga mempercepat implementasi pendekatan berbasis ekosistem di negara-negara berkembang.

Kesimpulan

Mengintegrasikan jasa ekosistem dalam pengelolaan lingkungan menghadapi tantangan besar, termasuk konflik kepentingan, kurangnya data ekonomi, dan keterbatasan regulasi. Namun, solusi seperti pendekatan berbasis ekosistem dalam desain infrastruktur, pengembangan alat valuasi ekonomi, dan kebijakan yang mendukung dapat membantu mengatasi hambatan ini. Dengan demikian, pengintegrasian jasa ekosistem dapat menjadi langkah penting menuju keberlanjutan ekologis dan kesejahteraan manusia. Pengintegrasian jasa ekosistem dalam pengelolaan lingkungan menghadapi berbagai tantangan, termasuk konflik kepentingan antara pembangunan dan pelestarian, kurangnya data ekonomi, serta keterbatasan regulasi yang mendukung. Untuk mengatasi tantangan ini, diperlukan langkah-langkah strategis seperti penerapan pendekatan berbasis ekosistem dalam desain infrastruktur, pengembangan alat valuasi ekonomi, dan kebijakan yang mendukung pelestarian ekosistem. Dengan mengintegrasikan jasa ekosistem secara optimal, dapat dicapai keseimbangan antara keberlanjutan ekologis dan kesejahteraan manusia di masa depan.

e. Pengaruh Pengelolaan Sungai Berbasis Ekosistem terhadap Keberlanjutan Lingkungan

Pendekatan berbasis ekosistem dalam pengelolaan sungai adalah strategi yang dirancang untuk mengintegrasikan fungsi ekologi sungai dengan kebutuhan manusia. Pendekatan ini memberikan manfaat yang signifikan dalam mendukung keberlanjutan lingkungan. Artikel ini akan membahas dua aspek utama: hubungan antara pengelolaan sungai berbasis ekosistem dengan tujuan pembangunan berkelanjutan (*Sustainable Development Goals*, SDGs) dan dampaknya terhadap keanekaragaman hayati serta mitigasi perubahan iklim.

Sungai merupakan salah satu komponen ekosistem yang paling vital, menyediakan berbagai layanan ekosistem mulai dari pasokan air bersih, pengaturan siklus hidrologi, hingga sebagai habitat bagi berbagai spesies flora dan fauna. Namun, urbanisasi yang cepat, perubahan penggunaan lahan, dan polusi telah menyebabkan degradasi sungai di seluruh dunia. Kondisi ini menuntut pendekatan yang lebih berkelanjutan dalam pengelolaan sumber daya air untuk memastikan kelangsungan fungsi ekologis dan manfaat sosial-ekonomi yang diberikannya.

Pendekatan berbasis ekosistem menjadi solusi yang semakin diakui untuk mengatasi tantangan ini. Dengan mempertimbangkan interaksi antara komponen biotik dan abiotik dalam ekosistem sungai, pendekatan ini tidak hanya berfokus pada pengelolaan air sebagai sumber daya tetapi juga melibatkan perlindungan dan restorasi habitat yang mendukung keberlanjutan ekologis secara keseluruhan. Hal ini selaras dengan upaya global untuk mencapai Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), khususnya dalam hal akses air bersih, pelestarian keanekaragaman hayati, dan mitigasi perubahan iklim.

Selain itu, pendekatan ini juga mencakup keterlibatan masyarakat lokal dalam proses pengelolaan, yang memainkan peran penting dalam memastikan keberlanjutan program jangka panjang.

Partisipasi masyarakat memungkinkan terciptanya solusi yang adaptif dan sesuai dengan kebutuhan lokal, sehingga meningkatkan peluang keberhasilan inisiatif pengelolaan berbasis ekosistem. Dengan begitu, pendekatan ini tidak hanya melestarikan lingkungan tetapi juga meningkatkan kesejahteraan masyarakat.

1. Hubungan antara Pengelolaan Sungai Berbasis Ekosistem dengan SDGs

a. Tujuan Pembangunan Berkelanjutan yang Terkait

Pengelolaan sungai berbasis ekosistem berkontribusi secara langsung dan tidak langsung pada beberapa tujuan dalam SDGs, termasuk:

- 1) SDG 6 (Air Bersih dan Sanitasi):** Melalui perlindungan dan restorasi ekosistem sungai, kualitas air dapat ditingkatkan, mendukung akses masyarakat terhadap air bersih. Pengelolaan berbasis ekosistem memastikan akses masyarakat terhadap air bersih dengan cara:
 - a) Meningkatkan kualitas air melalui restorasi vegetasi riparian yang bertindak sebagai penyaring alami polutan. (Gopal, 2016).
 - b) Memastikan keberlanjutan sumber air dengan menjaga fungsi hidrologis sungai. (Iskandar et al., 2019).
- 2) SDG 13 (Aksi Iklim):** Sungai yang dikelola secara berkelanjutan membantu mitigasi dan adaptasi terhadap perubahan iklim melalui:
 - a) Penyerapan karbon oleh lahan basah dan vegetasi riparian. (Mitsch et al, 2015).
 - b) Pengurangan risiko banjir melalui peningkatan kapasitas penyerapan air hujan oleh ekosistem sungai yang sehat. (Verhoeven et al., 2018).
- 3) SDG 15 (Ekosistem Darat):** Pengelolaan sungai berbasis ekosistem melestarikan keanekaragaman hayati dengan:
 - a) Melindungi habitat alami bagi flora dan fauna.
 - b) Mendorong pemulihan spesies terancam di lingkungan perairan dan daratan sekitar sungai.

4) SDG 10 (Mengurangi Ketimpangan): Pendekatan ini berkontribusi pada pengurangan ketimpangan sosial dengan menyediakan akses yang adil terhadap sumber daya air bagi semua kelompok masyarakat, termasuk komunitas rentan yang bergantung pada sungai untuk mata pencaharian (WWF, 2016).

b. Implementasi dalam Pengelolaan Sungai

1) Perbaikan Kualitas Air: Pendekatan berbasis ekosistem seperti restorasi vegetasi riparian membantu menyaring polutan, sehingga meningkatkan kualitas air sungai. Contoh implementasi ini dapat ditemukan dalam proyek restorasi Sungai Thames di Inggris, yang mengurangi tingkat polusi melalui pendekatan berbasis ekosistem (Gopal, 2016). Pengelolaan air secara terpadu membantu meningkatkan ketahanan masyarakat terhadap perubahan iklim, mendukung ketahanan pangan, dan memperbaiki kondisi kesehatan masyarakat dengan menyediakan air bersih yang berkualitas (Iskandar et al., 2019). Selain itu, strategi ini juga mencakup pengelolaan hulu hingga hilir sungai, memastikan penggunaan air yang efisien di berbagai sektor, termasuk pertanian, industri, dan rumah tangga. Pendekatan ini telah diterapkan di beberapa proyek di Asia Tenggara, yang berhasil meningkatkan efisiensi air hingga 30%.

2) Peningkatan Ketahanan Sosial: Sungai yang sehat menyediakan sumber daya seperti air bersih dan habitat untuk perikanan, yang mendukung kesejahteraan masyarakat dan mengurangi ketimpangan sosial (SDG 10).

3) Restorasi Vegetasi Riparian: Restorasi ini memainkan peran penting dalam meningkatkan kualitas air sungai dan mendukung keberlanjutan ekosistem lokal. Sebagai contoh, proyek restorasi Sungai Thames di Inggris menunjukkan bahwa pendekatan berbasis ekosistem berhasil

mengurangi tingkat polusi, sehingga mendukung habitat perairan yang lebih sehat (Gopal, 2016).

c. Studi Kasus: Restorasi Sungai Rhine

Restorasi Sungai Rhine di Eropa adalah salah satu contoh sukses yang menunjukkan bagaimana pengelolaan berbasis ekosistem berkontribusi pada SDGs. Proyek ini mengintegrasikan restorasi lahan basah, vegetasi riparian, dan pengurangan polusi untuk meningkatkan kualitas air dan mengurangi risiko banjir. Hasilnya, Sungai Rhine kini menjadi salah satu sungai dengan kualitas air terbaik di Eropa, mendukung ekosistem yang lebih sehat dan memberikan manfaat langsung kepada masyarakat sekitar (WWF, 2016). Proyek ini juga melibatkan partisipasi aktif dari masyarakat lokal dan pemerintah setempat, menciptakan model keberlanjutan yang dapat diadaptasi secara global.

2. Dampak terhadap Keanekaragaman Hayati dan Mitigasi Perubahan Iklim

a. Dampak terhadap Keanekaragaman Hayati

Sungai adalah ekosistem yang kaya akan keanekaragaman hayati, mendukung berbagai spesies flora dan fauna. Pendekatan berbasis ekosistem memainkan peran penting dalam melestarikan dan memulihkan keanekaragaman hayati sungai.

1) Restorasi Habitat: Pengelolaan berbasis ekosistem mencakup restorasi habitat alami, seperti lahan basah dan vegetasi riparian, yang menjadi tempat hidup penting bagi berbagai spesies. Misalnya, proyek restorasi Sungai Ciliwung di Indonesia berhasil meningkatkan populasi ikan lokal dengan mengurangi polusi dan memperbaiki habitat akuatik (Iskandar et al., 2019). Selain itu, restorasi ini juga menciptakan ekosistem mikro yang mendukung organisme kecil seperti plankton yang penting untuk rantai makanan.

2) Perlindungan Spesies Terancam: Sungai yang dikelola dengan pendekatan ekosistem menyediakan

kondisi yang mendukung kelangsungan hidup spesies terancam, seperti lumba-lumba sungai di Amazon dan ikan salmon di Amerika Utara (Moss et al., 2015). Pendekatan ini melibatkan pengendalian aktivitas manusia yang merusak habitat seperti penangkapan ikan berlebihan dan pembangunan infrastruktur yang tidak ramah lingkungan.

b. Dampak terhadap Mitigasi Perubahan Iklim

Sungai yang dikelola secara berkelanjutan dapat berkontribusi pada mitigasi perubahan iklim melalui beberapa mekanisme:

- 1) Penyerapan Karbon:** Ekosistem sungai seperti lahan basah dan vegetasi riparian menyimpan karbon dalam biomassa dan sedimen, membantu mengurangi konsentrasi karbon dioksida di atmosfer (Mitsch et al., 2015). Penanaman vegetasi asli pada ekosistem riparian juga meningkatkan kemampuan penyimpanan karbon.
- 2) Reduksi Emisi Metana:** Restorasi ekosistem lahan basah dapat mengurangi emisi metana dengan meningkatkan kadar oksigen dalam air dan tanah (Verhoeven et al., 2018). Ini juga berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca secara global.
- 3) Pengelolaan Banjir:** Sungai yang dikelola secara alami memiliki kapasitas yang lebih besar untuk menyerap air hujan, mengurangi risiko banjir yang sering diperburuk oleh perubahan iklim. Infrastruktur alami ini lebih efektif dibandingkan solusi buatan dalam menahan aliran air yang tinggi selama musim hujan.

c. Studi Kasus: Restorasi Lahan Basah di Mississippi

Restorasi lahan basah di sepanjang Sungai Mississippi, Amerika Serikat, menunjukkan bagaimana ekosistem sungai dapat mendukung mitigasi perubahan iklim. Proyek ini mencakup penanaman vegetasi asli dan pengurangan polusi untuk meningkatkan kapasitas penyimpanan karbon. Hasilnya, lahan basah ini mampu menyerap lebih dari 200 juta ton karbon dioksida per tahun, mendukung

tujuan mitigasi iklim global. Restorasi lahan basah di sepanjang Sungai Mississippi menunjukkan bagaimana mitigasi perubahan iklim dapat dicapai melalui pendekatan berbasis ekosistem. Proyek ini mencakup penanaman vegetasi asli dan pengurangan polusi, yang memungkinkan lahan basah menyerap lebih dari 200 juta ton karbon dioksida per tahun. Selain itu, ekosistem ini juga meningkatkan ketahanan masyarakat lokal terhadap banjir dan bencana alam lainnya (Opperman et al., 2017).

3. Manfaat Sinergis dari Pendekatan Berbasis Ekosistem

a. Keberlanjutan Ekologi

Pengelolaan sungai berbasis ekosistem mendukung keberlanjutan ekologi dengan memperkuat fungsi alami sungai, termasuk siklus nutrisi, transportasi sedimen, dan penyediaan habitat. Fungsi-fungsi ini adalah dasar bagi ekosistem yang sehat dan stabil.

b. Keberlanjutan Ekonomi

Pendekatan ini memberikan manfaat ekonomi jangka panjang melalui pengurangan biaya yang terkait dengan kerusakan ekosistem, pengelolaan banjir, dan mitigasi bencana. Sungai yang sehat juga mendukung sektor perikanan, pariwisata, dan pertanian.

c. Keberlanjutan Sosial

Dengan menyediakan air bersih, habitat ikan, dan perlindungan terhadap bencana alam, pengelolaan berbasis ekosistem meningkatkan kualitas hidup masyarakat dan mendukung ketahanan sosial.

4. Strategi Implementasi Pengelolaan Sungai Berbasis Ekosistem

a. Restorasi Ekosistem Sungai

- 1) Penanaman vegetasi asli di daerah riparian. Hal ini tidak hanya membantu mengurangi erosi tetapi juga memperkuat konektivitas ekosistem antara sungai dan daratan sekitarnya.

- 2) Pengelolaan limbah domestik dan industri. Pengolahan limbah yang lebih baik diperlukan untuk mencegah masuknya polutan ke dalam sungai, menjaga kualitas air.

b. Kebijakan dan Regulasi

- 1) Penerapan regulasi yang ketat terkait pembuangan limbah. Regulasi ini harus didukung dengan sistem pengawasan yang efektif untuk memastikan kepatuhan.
- 2) Insentif bagi komunitas lokal untuk terlibat dalam konservasi sungai. Misalnya, pemberian subsidi untuk teknologi ramah lingkungan yang mendukung perlindungan sungai.

c. Partisipasi Komunitas

- 1) Edukasi masyarakat tentang pentingnya konservasi sungai. Edukasi ini harus disesuaikan dengan budaya lokal untuk meningkatkan efektivitasnya.
- 2) Pelibatan masyarakat dalam program restorasi. Proyek yang melibatkan masyarakat cenderung lebih berhasil karena adanya rasa tanggung jawab bersama.

Kesimpulan

Hubungan antara pengelolaan sungai berbasis ekosistem dengan SDGs sangat erat dan saling mendukung. Pendekatan ini tidak hanya memberikan manfaat ekologis, tetapi juga mendukung kesejahteraan sosial dan ekonomi melalui peningkatan kualitas hidup masyarakat, pelestarian lingkungan, dan mitigasi perubahan iklim. Dengan penerapan yang efektif, pengelolaan sungai berbasis ekosistem dapat menjadi model keberlanjutan yang mengintegrasikan kebutuhan manusia dengan kelestarian alam.

Pendekatan berbasis ekosistem dalam pengelolaan sungai berkontribusi secara signifikan terhadap keberlanjutan lingkungan. Strategi ini mendukung tujuan SDGs, melestarikan keanekaragaman hayati, dan membantu mitigasi perubahan iklim. Dengan mengintegrasikan fungsi ekologi sungai ke dalam perencanaan dan kebijakan, pengelolaan berbasis ekosistem dapat memberikan manfaat yang luas bagi lingkungan, ekonomi, dan masyarakat.

DAFTAR PUSTAKA

- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., & van den Belt, M. (1997).
The value of the world's ecosystem services and natural capital.
Nature, 387(6630), 253-260.
<https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA). (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Island Press.
- WWF. (2016). *Living Planet Report 2016: Risk and resilience in a new era*. World Wildlife Fund International.
- World Health Organization (WHO). (2011). *Guidelines for Drinking-water Quality*. Fourth Edition. Geneva: WHO.
- United Nations International Children's Emergency Fund (UNICEF). (2018). *Water, Sanitation and Hygiene (WASH)*. New York: UNICEF.
- VALUASI EKONOMI JASA EKOSISTEM SUNGAI CODE PENGGAL GEMAWANG - SARDJITO
Jasa Ekosistem dalam Perspektif Masyarakat Perkotaan di Sungai Code | Jannah | Majalah Geografi Indonesia
Panduan Lengkap Memahami Siklus Nutrisi dalam Ekosistem
- Gopal, B. (2016). Urban water ecosystems: Their features, values, and challenges. *Journal of Urban Ecology*, 2(1), juw006.
<https://doi.org/10.1093/jue/juw006>
- Iskandar, A., Nugraha, A., & Wibisono, H. (2019). Ecosystem-based flood management approach: A case study of the Ciliwung River. *Environmental Science and Policy*, 102, 45–56.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.09.002>
- Mitsch, W. J., Bernal, B., & Hernandez, M. E. (2015). Ecosystem services of wetlands. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 11(1), 1–4.
<https://doi.org/10.1080/21513732.2015.1006250>
- Moss, B., Kosten, S., Meerhoff, M., Battarbee, R. W., Jeppesen, E., Mazzeo, N., & Scheffer, M. (2015). Allied attack: Climate change and eutrophication. *Inland Waters*, 1(2), 101–105.
<https://doi.org/10.5268/IW-1.2.359>

- Opperman, J. J., Moyle, P. B., & Florsheim, J. L. (2017). Floodplains: Processes and management for ecosystem services. *Earth Science Reviews*, 86(1), 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.09.002>
- Verhoeven, J. T. A., Arheimer, B., Yin, C., & Hefting, M. M. (2018). Regional and global concerns over wetlands and water quality. *Trends in Ecology & Evolution*, 21(2), 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.11.015>
- WWF. (2016). *Living Planet Report 2016: Risk and resilience in a new era*. World Wildlife Fund International.
- Jurnal_Abstrak_Pemanfaatan_Lahan_Pada_Daerah_Aliran_Sungai_DAS_Berbasis_Mitigasi_dan_Adaptasi_Perubahan_Iklim.pdf
Strategi dan Kebijakan Pengelolaan DAS Berbasis Masyarakat untuk Mendukung Pembangunan Berkelanjutan – Konservasi DAS (PDF) Strategi Pengelolaan Daerah Aliran Sungai DAS di Indonesia Menyelamatkan Laut dengan Pendekatan Berbasis Ekosistem - Kompasiana.com
- Perspektif Ekosentris untuk Menyelamatkan Kehidupan Bumi di Atas Ambisi Ekonomi | kumparan.com
coraltriangleinitiative.org/sites/default/files/resources/4_EcosystemApproachtoFisheriesManagement_FisheriesinIndonesia_BahasaIndonesia.pdf?form=MG0AV3
- Gopal, B. (2016). Urban water ecosystems: Their features, values, and challenges. *Journal of Urban Ecology*, 2(1), juw006. <https://doi.org/10.1093/jue/juw006>
- Iskandar, A., Nugraha, A., & Wibisono, H. (2019). Ecosystem-based flood management approach: A case study of the Ciliwung River. *Environmental Science and Policy*, 102, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.09.002>
- Mitsch, W. J., Bernal, B., & Hernandez, M. E. (2015). Ecosystem services of wetlands. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 11(1), 1–4. <https://doi.org/10.1080/21513732.2015.1006250>
- Moss, B., Kosten, S., Meerhoff, M., Battarbee, R. W., Jeppesen, E., Mazzeo, N., & Scheffer, M. (2015). Allied attack: Climate

- change and eutrophication. *Inland Waters*, 1(2), 101–105.
<https://doi.org/10.5268/IW-1.2.359>
- Opperman, J. J., Moyle, P. B., & Florsheim, J. L. (2017). Floodplains: Processes and management for ecosystem services. *Earth Science Reviews*, 86(1), 123–134.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.09.002>
- Verhoeven, J. T. A., Arheimer, B., Yin, C., & Hefting, M. M. (2018). Regional and global concerns over wetlands and water quality. *Trends in Ecology & Evolution*, 21(2), 96–103.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.11.015>
- WWF. (2016). *Living Planet Report 2016: Risk and resilience in a new era*. World Wildlife Fund International.
- Brauman, K. A., Daily, G. C., Duarte, T. K., & Mooney, H. A. (2007). The nature and value of ecosystem services: An overview highlighting hydrologic services. *Annual Review of Environment and Resources*, 32, 67–98.
<https://doi.org/10.1146/annurev.energy.32.031306.102758>
- Fisher, S. G., Heffernan, J. B., Sponseller, R. A., & Welter, J. R. (2004). Material processing by biome boundaries: Nutrient cycling and regulation in riparian forest. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 35(1), 101–130.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.112202.130138>
- Ghermandi, A., van den Bergh, J. C., Brander, L. M., de Groot, H. L., & Nunes, P. A. (2010). The economic value of wetland conservation and restoration: A meta-analysis. *Ecological Economics*, 69(5), 1052–1062.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.10.007>
- Kondolf, G. M., Boulton, A. J., O'Daniel, S., Poole, G. C., & Rahel, F. J. (2001). Integrating ecosystem management and environmental flows: River restoration priorities in the United States and Australia. *Ecological Applications*, 11(5), 1249–1260.
[https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2001\)011\[1249:IEMAEF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2001)011[1249:IEMAEF]2.0.CO;2)
- Naiman, R. J., & Decamps, H. (1997). The ecology of interfaces: Riparian zones. *Annual Review of Ecology and Systematics*,

- 28(1), 621-658.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.28.1.621>
- Naiman, R. J., Decamps, H., & McClain, M. E. (2005). *Riparia: Ecology, conservation, and management of streamside communities*. Elsevier Academic Press
- Postel, S., & Richter, B. (2003). *Rivers for life: Managing water for people and nature*. Island Press.
- Ulrich, R. S., Simons, R. F., Losito, B. D., Fiorito, E., Miles, M. A., & Zelson, M. (1991). Stress recovery during exposure to natural and urban environments. *Journal of Environmental Psychology*, 11(3), 201-230. [https://doi.org/10.1016/S0272-4944\(05\)80184-7](https://doi.org/10.1016/S0272-4944(05)80184-7)
- Welcomme, R. L. (2001). *Inland fisheries: Ecology and management*. Wiley-Blackwell.
- Guidelines for Drinking-water Quality, Fourth edition incorporating the first addendum*. (WHO, 2011)
- Jurnal Akuakultur Sungai dan Danau*. (2024). "Efektivitas Penambahan Molase dan Sari Tebu Sebagai Sumber Karbohidrat Terhadap Kelimpahan Plankton dan Performa Ikan Nila (*Oreochromis niloticus*) Dalam Sistem Bioflok."
- Aquacultura Indonesiana*. (2024). "Aquacultura Indonesiana: Jurnal Ilmiah tentang Budidaya Ikan dan Organisme Laut Lainnya."
- Plasticsmartcities.wwf.id. "Eco Riparian Konservasi Lingkungan dengan Pendekatan Alamiah di Kawasan Perairan."
- Noer Sarifah Ainy, *et al.* "STRUKTUR VEGETASI RIPARIAN SUNGAI PESANGGRAHAN KELURAHAN LEBAK BULUS JAKARTA."
- Sridianti.com. (2024). "Karakteristik Lahan Basah: Pengertian, Jenis, dan Fungsinya."
- Kusnadi. (n.d.). "BAB XI MIKRO LINGKUNGAN BAB 11 MIKROBIOLOGI LINGKUNGAN A. MIKROBIOLOGI AIR."
- Forestation FKT UGM. (2019). "Vegetasi Riparian, Seberapa Penting Sih?"
- Neliti. (2024). "Kajian Potensi Vegetasi dalam Konservasi Air dan Tanah di Daerah Aliran Sungai (DAS)."
- Plasticsmartcities.wwf.id. "Eco Riparian Konservasi Lingkungan dengan Pendekatan Alamiah di Kawasan Perairan."

- Kompasiana. (2024). "Lahan Basah dan Perannya dalam Sistem Atmosfer."
- Pusat Penelitian Lingkungan Hidup. (2023). "Manfaat Estetika Sungai terhadap Kesejahteraan Psikologis."
- Institut Real Estat Dunia. (2024). "Pengaruh Lokasi Terhadap Nilai Properti."
- Postel, S., & Richter, B. (2003). "Rivers for Life: Managing Water for People and Nature."
- Fisher, S. G., et al. (2004). "Effects of Nutrient Cycling in River Ecosystems."
- Brauman, K. A., Daily, G. C., Duarte, T. K., & Mooney, H. A. (2007). The nature and value of ecosystem services: An overview highlighting hydrologic services. *Annual Review of Environment and Resources*, 32, 67–98. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.32.031306.102758>
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., & van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253–260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Naiman, R. J., & Decamps, H. (1997). The ecology of interfaces: Riparian zones. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 28, 621–658. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.28.1.621>
- Naiman, R. J., Decamps, H., & McClain, M. E. (2005). *Riparia: Ecology, conservation, and management of streamside communities*. Elsevier Academic Press.
- Postel, S., & Richter, B. (2003). *Rivers for life: Managing water for people and nature*. Island Press.
- Ulrich, R. S., Simons, R. F., Losito, B. D., Fiorito, E., Miles, M. A., & Zelson, M. (1991). Stress recovery during exposure to natural and urban environments. *Journal of Environmental Psychology*, 11(3), 201–230. [https://doi.org/10.1016/S0272-4944\(05\)80184-7](https://doi.org/10.1016/S0272-4944(05)80184-7)
- WWF. (2016). *Living Planet Report 2016: Risk and resilience in a new era*. World Wildlife Fund International.
- Badan Lingkungan Hidup Dunia. (2021). *Sungai yang sehat dan keberlanjutan ekosistem*. World Environmental Organization.

- Dr. Ir. Robert J. Kodoatie dan Ir. Sugiyanto. (2002). *Pengelolaan Banjir dan Konservasi Lingkungan*.
- International Union for Conservation of Nature (IUCN). (2021). *Conserving Rivers and Water Ecosystems*.
- Komisi Brundtland Perserikatan Bangsa-Bangsa. (1987). *Our Common Future*.
- National Research Council. (2006). *Understanding Risk in Environmental Management*.
- World Health Organization (WHO). (2006). *Guidelines for Natural Disaster Risk Management*.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2020). *The State of Food Security and Nutrition in the World*.
- Stone, D. (1974). *American Public Works Association Standards*.
- World Tourism Organization (WTO). (2021). *Global Tourism and Recreational Activities*.
- ISO 37101:2016. (2016). *Sustainable development in communities*.
- Friess, D. A., Rogers, K., Lovelock, C. E., Krauss, K. W., Hamilton, S. E., & Lee, S. Y. (2019). The state of the world's mangrove forests: Past, present, and future. *Annual Review of Environment and Resources*, 44(1), 89–115. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-101718-033302>
- Iskandar, A., Nugraha, A., & Wibisono, H. (2019). Ecosystem-based flood management approach: A case study of the Ciliwung River. *Environmental Science and Policy*, 102, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.09.002>
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2015). *Wetlands*. Wiley.
- Opperman, J. J., Moyle, P. B., & Florsheim, J. L. (2017). Floodplains: Processes and management for ecosystem services. *Earth Science Reviews*, 86(1), 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.09.002>
- Sari, L., Priyono, E., & Wahyuni, R. (2021). Community-based water management for urban resilience: Lessons from the Ciliwung River project. *Urban Water Journal*, 18(1), 67–78. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2021.1872835>
- Wardhana, E., Santoso, H., & Kusuma, F. (2020). Riparian zone restoration for sustainable urban river management: The case of Ciliwung River. *Journal of River Basin Management*,

- 18(4), 411–421.
<https://doi.org/10.1080/15715124.2020.1732917>
- Verhoeven, J. T. A., Arheimer, B., Yin, C., & Hefting, M. M. (2006). Regional and global concerns over wetlands and water quality. *Trends in Ecology & Evolution*, 21(2), 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.11.015>.
- Rahman, S., & Subhan, A. (2019). Rahayu, S., & Sudrajat, D. (2020).
- Daily, G. C. (1997). *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., & van den Belt, M. (1997). *The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital*. *Nature*, 387(6630), 253–260.
- Barbier, E. B. (2007). *Valuing Ecosystem Services as Productive Inputs*. *Economic Policy*, 22(3), 178–227.
- TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity) (2010). *The Economics of Ecosystems and Biodiversity Ecological and Economic Foundations*. Pushpam Kumar (Ed.).
- Earthscan. UNEP (United Nations Environment Programme) (2011). *Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication*. United Nations Environment Programme.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., & van den Belt, M. (1997). *The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital*. *Nature*, 387(6630), 253–260.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., & van den Belt, M. (1997). *The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital*. *Nature*, 387(6630), 253–260
- Abell, R., Asquith, N. M., Boccaletti, G., Bremer, L. L., & Chaplin-Kramer, R. (2017). Beyond the Source: The Environmental, Economic and Community Benefits of Source Water Protection. *Nature Conservancy*.
<https://doi.org/10.1146/annurev-environ-041616-061208>

- Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2012). *Green infrastructure: Linking landscapes and communities*. Island Press.
- McClain, M. E., Boyer, E. W., Dent, C. L., Gergel, S. E., Grimm, N. B., & Lewis, W. M. (2014). Biogeochemical hot spots and hot moments at the interface of terrestrial and aquatic ecosystems. *Ecosystems*, 6(4), 301–312. <https://doi.org/10.1007/s10021-003-0161-9>
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2015). *Wetlands*. Wiley.
- Naiman, R. J., Decamps, H., & McClain, M. E. (2005). *Riparia: Ecology, conservation, and management of streamside communities*. Elsevier Academic Press.
- Opperman, J. J., Moyle, P. B., & Florsheim, J. L. (2017). Floodplains: Processes and management for ecosystem services. *Earth Science Reviews*, 86(1), 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.09.002>
- Poff, N. L., & Zimmerman, J. K. H. (2010). Ecological responses to altered flow regimes: A literature review to inform environmental flows science and management. *Freshwater Biology*, 55(1), 194–205. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02272.x>
- Sayer, J., Sunderland, T., & Ghazoul, J. (2013). Ten principles for a landscape approach to reconciling agriculture, conservation, and other competing land uses. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(21), 8349–8356. <https://doi.org/10.1073/pnas.1210595110>
- Van den Brink, C., Fuchs, R., & van der Zee, J. (2016). Integrated flood management in the Netherlands: Combining engineering and ecosystem-based approaches. *Water Policy*, 18(S2), 228–240. <https://doi.org/10.2166/wp.2016.013>
- Verhoeven, J. T. A., Arheimer, B., Yin, C., & Hefting, M. M. (2006). Regional and global concerns over wetlands and water quality. *Trends in Ecology & Evolution*, 21(2), 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.11.015>
- Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. (1982). *Hydrology for Engineers*. McGraw-Hill.
- Hassan, M. W. H. (2001). *Hidrologi Dasar*. Yogyakarta: Penerbit Andi

Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) menjelaskan bahwa air yang aman adalah air yang bebas dari kontaminan seperti logam berat, bahan kimia beracun, dan mikroorganisme patogen yang dapat menyebabkan penyakit.

<https://teknik.uma.ac.id/2024/12/10/metode-pengendalian-erosi-pada-proyek-konstruksi/>

https://www.academia.edu/97100435/Water_Temperature_Control_Using_PID_Control_System_Based_on_LabVIEW

https://www.cifor-icraf.org/publications/pdf_files/Books/Keanekaragaman-Hayati.pdf

Lal, R. (2015). *Soil conservation and ecosystem services*. Springer.

Gleick, P. H., Cooley, H. S., & Morrison, J. (2017). *The world's water: The biennial report on freshwater resources*. Island Press.

Van den Brink, C., Fuchs, R., & van der Zee, J. (2016). Integrated flood management in the Netherlands: Combining engineering and ecosystem-based approaches. *Water Policy*, 18(S2), 228–240. <https://doi.org/10.2166/wp.2016.013>

IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press.

Gleick, P. H. (2018). *The world's water: The biennial report on freshwater resources*. Island Press.

IUCN (International Union for Conservation of Nature) tentang *Nature-Based Solutions* (NBS)

Grill, G., Lehner, B., Thieme, M., Geenen, B., Tickner, D., Antonelli, F., ... & Crochetiere, H. (2019). Mapping the world's free-flowing rivers. *Nature*, 569(7755), 215–221. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1111-9>

Lestari, S. R., Nugroho, B., & Wijayanto, D. S. (2021). Ecosystem services trade-offs in urban coastal development: A case study of Jakarta Bay reclamation. *Ocean & Coastal Management*, 203, 105472. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105472>

Primavera, J. H., & Esteban, J. M. A. (2019). A review of mangrove rehabilitation in the Philippines: Successes, failures, and future prospects. *Wetlands Ecology and Management*, 26(4), 385–403. <https://doi.org/10.1007/s11273-019-9638-5>

- Sabo, J. L., Ruhi, A., Holtgrieve, G. W., Elliott, V., & Bartz, K. K. (2017). Designing river flows to improve food security futures in the Lower Mekong Basin. *Science*, 358(6368), 711–716. <https://doi.org/10.1126/science.aao1053>
- Wardhana, E., Santoso, H., & Kusuma, F. (2020). Riparian zone restoration for sustainable urban river management: The case of Ciliwung River. *Journal of River Basin Management*, 18(4), 411–421. <https://doi.org/10.1080/15715124.2020.1732917>
- Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., van der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., ... & Turner, R. K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26, 152–158. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>
- Daily, G. C., Polasky, S., Goldstein, J., Kareiva, P. M., Mooney, H. A., Pejchar, L., ... & Shallenberger, R. (2009). Ecosystem services in decision making: Time to deliver. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(1), 21–28. <https://doi.org/10.1890/080025>
- TEEB. (2010). *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations*. Earthscan, London and Washington.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., Koch, E. W., Stier, A. C., & Silliman, B. R. (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 81(2), 169–193. <https://doi.org/10.1890/10-1510.1>

BAB 5

MANAJEMEN BANJIR DAN MITIGASI RISIKO

Oleh Ady Purnama

5.1 Pendahuluan

Banjir merupakan fenomena alam yang sering terjadi di berbagai wilayah di dunia, termasuk Indonesia. Fenomena ini dapat menyebabkan kerugian materiil maupun non materiil, sehingga dibutuhkan manajemen banjir yang terpadu dan berkelanjutan. Manajemen banjir bertujuan untuk melindungi masyarakat, lingkungan, dan infrastruktur dari kerugian yang disebabkan oleh dampak banjir secara langsung maupun tidak langsung (Chow et al, 1988).

Pentingnya mitigasi risiko yang melibatkan pendekatan struktural (pembangunan bendung, bendungan, dan sistem drainase) dan non-struktural (sistem peringatan dini, perencanaan tata ruang, dan edukasi masyarakat) dalam penanganan masalah banjir dan dampaknya (Wisner et al, 2004).

Menurut (IPCC, 2021), pentingnya pendekatan dari manajemen risiko banjir yang terintegrasi antara pemahaman risiko, adaptasi terhadap perubahan iklim, dan keterlibatan *stakeholder* atau pemangku kepentingan dalam perencanaan.

5.2 Definisi dan Penyebab Banjir

5.2.1 Definisi Banjir

Banjir adalah aliran air yang meluap melampaui kapasitas alami suatu sistem drainase, sungai, dan danau sehingga menggenangi wilayah sekitarnya. Penyebabnya akibat curah hujan yang cukup tinggi, kenaikan permukaan laut, luapan sungai, atau faktor alami dan antropogenik (Smith, K., & Ward, R, 1998).

Menurut Suripin (2004), banjir merupakan peristiwa meluapnya air dari sungai, saluran air, atau danau akibat curah

hujan yang tinggi, sehingga menyebabkan tergenangnya daerah disekitarnya.



Gambar 5.1. Fenomena Banjir Jakarta
(Sumber : Yuniarto, T, 2023)

5.2.2 Penyebab Banjir

Banjir terjadi diakibatkan oleh faktor alam dan aktivitas manusia seperti; perubahan iklim, urbanisasi yang tidak terkendali, deforestasi, sistem drainase yang buruk, aktivitas manusia di wilayah aliran sungai, pengelolaan bendungan dan waduk yang buruk, fenomena alam, perubahan penggunaan lahan, penyumbatan saluran air oleh sampah, dan fenomena *La Nina* dan *El Nino*.

1. Perubahan Iklim

Perubahan iklim terjadi disebabkan oleh pemanasan global yang terus meningkat dan frekuensi hujan ekstrem, dan mencairnya es di kutub utara yang mengakibatkan kenaikan permukaan air laut. Dampaknya terhadap wilayah pesisir dan dataran rendah akibat kenaikan permukaan air laut adalah risiko kerentanan terhadap banjir di wilayah tersebut.

Menurut laporan *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), meningkatnya suhu global akan menyebabkan uap air yang semakin banyak di atmosfer, sehingga dapat memicu hujan yang lebat serta banjir.



Gambar 5.2. Dampak Perubahan Iklim
(Sumber : ASPPUK, 2022)

2. Urbanisasi yang Tidak Terkendali

Pembangunan infrastruktur yang masif di suatu wilayah, biasanya akan mengabaikan pengelolaan drainase yang baik dan penyediaan ruang terbuka hijau. Akibatnya saluran banyak yang tersumbat dan juga kurangnya daerah resapan sehingga air hujan tidak dapat mengalir dengan baik. Hal ini merupakan dampak dari terjadinya urbanisasi yang tidak terkendali.

Urbanisasi yang sangat cepat di negara-negara berkembang seperti Indonesia, akan dapat meningkatkan risiko banjir di wilayah perkotaan karena lahan resapan air yang semakin berkurang (*World Bank, 2022*).

3. Deforestasi

Deforestasi merupakan perubahan secara permanen dari wilayah hutan menjadi wilayah tidak berhutan (perubahan tata guna lahan) yang diakibatkan oleh aktivitas manusia (*KLHK, 2020*)

Deforestasi terjadi disebabkan oleh penebangan hutan secara besar-besaran yang dapat mengurangi kemampuan tanah dalam menyerap air hujan karena sebagian besar menjadi air permukaan (*surface runoff*), sehingga dapat meningkatkan risiko banjir. Air permukaan yang besar mengakibatkan luapan air sungai lebih cepat, dan tanah longsor semakin sering terjadi yang bersamaan dengan banjir.

Menurut Kennial Laia (2024), dalam penelitiannya menjelaskan bahwa kehilangan hutan tropis akan dapat memperparah aliran air permukaan, khususnya di daerah alir sungai besar (DAS).



Gambar 5.3. Kondisi Deforestasi
(Sumber : Farah, N, 2022)

4. Sistem Drainase yang Buruk

Sistem drainase yang buruk atau kurang layak dapat menyebabkan terhambatnya aliran air hujan yang mengalir sehingga berdampak sering terjadinya banjir di perkotaan bahkan dengan curah hujan yang sedang.

Menurut *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, kota-kota besar didunia masih banyak menggunakan sistem drainase yang sudah lama (usang) sehingga sudah tidak sesuai lagi dengan kebutuhan saat ini.



Gambar 5.4. Dampak Drainase Buruk
(Sumber : Lingga, R.A, 2024)

5. Aktivitas Manusia di Wilayah Aliran Sungai

Aktivitas manusia di wilayah bantaran atau aliran sungai berupa pembangunan pemukiman, pertanian, dan industri dapat mengubah pola aliran air di sungai yang berdampak pada kapasitas sungai dalam menampung air hujan berkurang sehingga akan lebih mudah terjadi banjir.

Pembangunan yang terjadi pada daerah-daerah aliran sungai akan mempersempit jalur air sehingga meningkatkan risiko luapan sungai ke daratan (*World Water Forum, 2022*).



Gambar 5.5. Pembangunan di Sempadan Sungai
(Sumber : Speak Indonesia, 2021)

6. Pengelolaan Bendungan dan Waduk yang Buruk

Pengelolaan yang buruk terhadap waduk dan bendungan berupa pelepasan air yang tidak terkontrol dari bendungan atau waduk dapat mengakibatkan banjir di daerah bagian hilir bendung atau waduk. Dampaknya dari pengelolaan yang buruk tersebut menjadikan daerah bagian hilir sangat rentan terhadap banjir yang datang secara tiba-tiba.

Bendungan atau waduk di dunia banyak dirancang dengan sering tidak mempertimbangkan perubahan pola curah hujan akibat dari perubahan iklim (*International Rivers, 2023*).



Gambar 5.6. Pembangunan di Sempadan Sungai
(Sumber : Zulfan et al, 2023)

7. Fenomena Alam

Peristiwa atau fenomena alam yang terjadi seperti halnya tsunami, hujan deras, dan badai tropis yang berkepanjangan akan dapat menyebabkan banjir besar, sehingga berdampak pada kerusakan infrastruktur, gangguan ekonomi skala besar, bahkan kehilangan nyawa.

Menurut *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), badai tropis dan siklon yang terjadi akan sering membawa curah hujan ekstrem yang dapat mengakibatkan banjir besar di wilayah pesisir pantai.

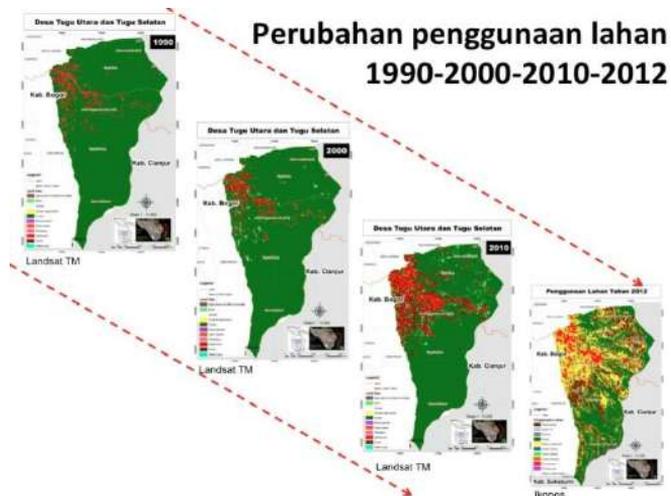


Gambar 5.7. Fenomena Alam di Indonesia
(Sumber : <https://kompasmu.github.io/tulisan/post/bencana-alam-yg-disebabkan-oleh-perubahan-cuaca-disebut/>)

8. Perubahan Penggunaan Lahan

Perubahan penggunaan lahan disebabkan oleh aktivitas manusia dalam merubah tutupan dan penggunaan lahan untuk kegiatan ekonomi seperti pemukiman, pertanian, dan industri (Lambin, E.F, and Geist, H.J, 2006).

Penggunaan teknologi dalam memahami perubahan penggunaan lahan dan faktor-faktor penting yang dapat menyebabkan perubahan lahan seperti, peningkatan permintaan terhadap sumber daya alam (energi atau bahan baku), dan perubahan iklim (pola curah hujan atau suhu) yang dapat mempengaruhi produktivitas pertanian dan kesuburan tanah (Schneider, J et al, 2009).



Gambar 5.8. Contoh Peta Perubahan Penggunaan Lahan
(Sumber : Sigit, R.R, 2014)

9. Penyumbatan Saluran Air oleh Sampah

Penyumbatan saluran air oleh sampah disebabkan oleh faktor sosial-ekonomi, dimana daerah dengan tingkat pendapatan rendah sering kali kesadaran dan kemampuan dalam membayar layanan kebersihan rendah sehingga sampah tidak dikelola dengan baik dan banyak yang terbuang ke saluran air. Penyebab lainnya adalah kurangnya Pendidikan

terhadap lingkungan terutama pendidikan tentang pentingnya menjaga lingkungan pada saluran air dan dampak buruknya.

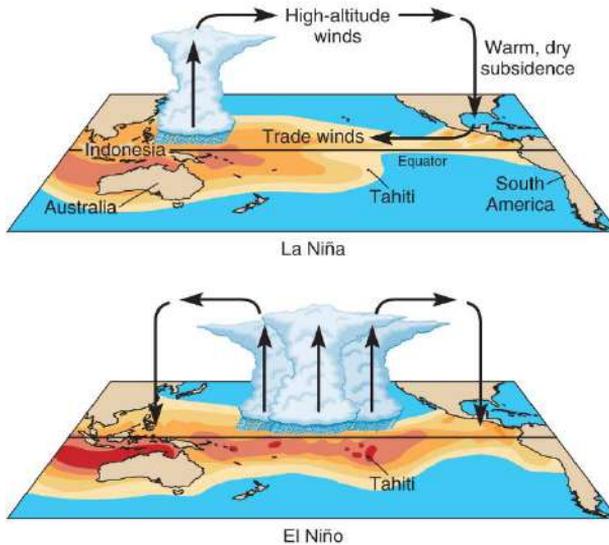


Gambar 5.9. Saluran yang tersumbat sampah
(Sumber: Joe Cortez, 2024)

10. Fenomena La Nina dan El Nino.

Fenomena La Nina memiliki dampak yang besar dalam mengubah pola curah hujan dan suhu di banyak bagian dunia bila dibandingkan dengan fenomena El Nino, dimana La Nina sering membawa musim hujan ke Kawasan Asia Tenggara dan menyebabkan suhu lebih rendah di Kawasan Amerika Utara dan negara bagian Utara lainnya (Wang et al, 2017).

Dampak dari fenomena El Nino dan La Nina menyebabkan perubahan besar dalam pola cuaca global, yang mencakup: badai tropis, kekeringan, dan banjir. Fenomena ini terjadi sebagai bagian dari *Oscilasi Selatan* dan memiliki dampak signifikan terhadap iklim global diberbagai belahan dunia.



Gambar 5.10. Fenomena La Nina dan El Nino

(Sumber: <https://www.gurugeografi.id/2017/01/anomali-cuaca-el-nino-dan-la-nina.html>)

5.3 Manajemen Banjir

Manajemen banjir adalah serangkaian tindakan terorganisir yang dirancang untuk mengurangi dampak banjir melalui pengelolaan risiko, kesiapsiagaan, respons, mitigasi, dan pemulihan. Pendekatan ini menekankan pada penggunaan teknologi prediksi dan peringatan dini dalam meningkatkan kewaspadaan terhadap banjir serta pengelolaan yang berbasis informasi teknologi (WMO, 2023).

5.3.1 Upaya Struktural

1. Pembangunan Infrastruktur

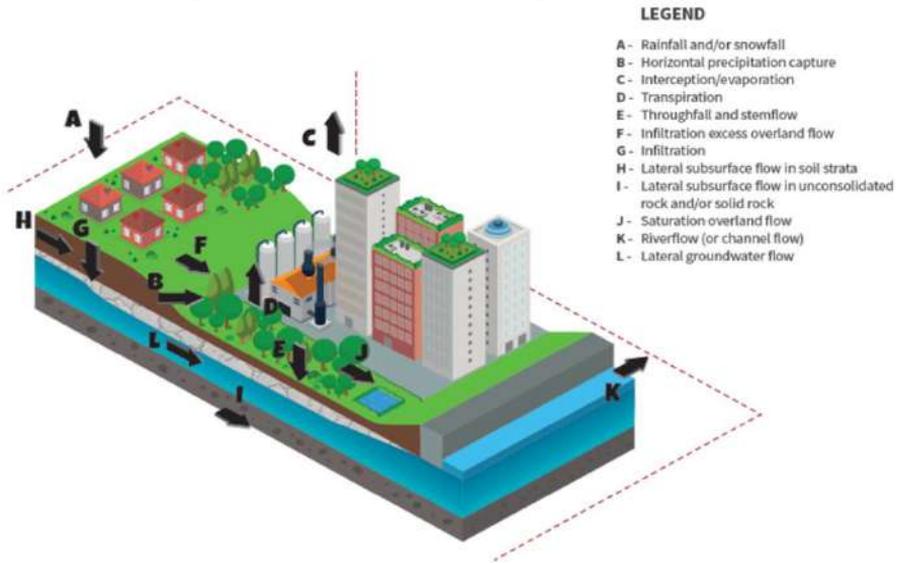
Upaya struktural melalui pembangunan infrastruktur dalam manajemen banjir, berupa:

- a. Pembangunan tanggul dan dinding penghalang (*Levee and Flood Walls*), yang berfungsi untuk mencegah masuknya air banjir ke lahan atau area pemukiman dan dibangun sepanjang sungai atau daerah yang rawan

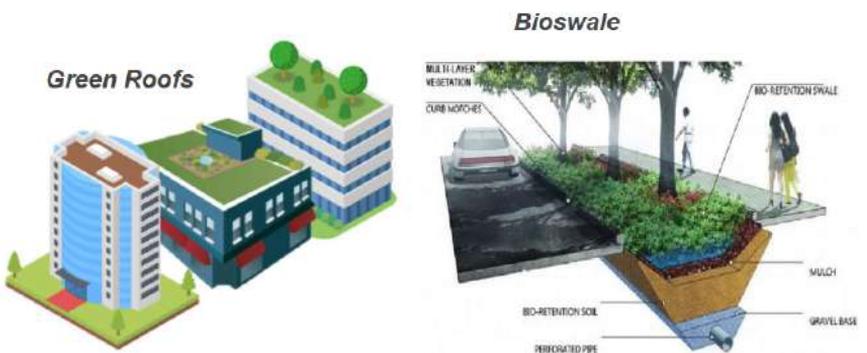
banjir. Contoh: Tanggul di sepanjang Sungai Mississippi di Amerika Serikat.

- b. Pembangunan Kanal dan Saluran Pengalir (*Flood Channels and Drainage Systems*), yang berfungsi untuk mengalirkan air banjir dari daerah atau area padat penduduk. Contoh: Kanal di Belanda dan Terusan Zues yang mengelola air hujan dan banjir.
- c. Pembangunan Bendungan dan Waduk (*Dams and Reservoirs*), yang berfungsi untuk menampung air sungai atau air hujan yang berlebih dalam mengurangi potensi banjir yang lebih besar dan sebagai ruang penyimpanan sementara untuk volume air serta dapat mengendalikan aliran sungai dan melepaskan secara terkontrol melalui intake atau pintu air. Contoh: Bendungan Three Gorges di China.
- d. Pompa dan Sistem Pengaliran (*Pumps and Drainage Systems*), yang berfungsi untuk mengalirkan air dari area yang terdampak banjir ke saluran atau sungai yang daya tampung lebih besar serta dapat mengurangi genangan air di area yang sulit dialirkan dengan metode gravitasi. Contoh: Sistem pompa di Belanda yang digunakan untuk menghindari banjir.
- e. Pengendalian Aliran Sungai (*River Channelization*), yang berfungsi untuk memperbaiki aliran sungai yang kurang teratur dan mengurangi risiko banjir, dimana pekerjaannya mencakup perataan, pengerukan, dan bahkan pembangunan kanal buatan. Contoh: Sungai Rhine di Eropa.
- f. Penanaman Vegetasi dan Rehabilitasi Lahan (*Riparian Buffers and Wetland Restoration*), yang berfungsi untuk memperkuat daya serap tanah terhadap air hujan dengan mengurangi kecepatan aliran air dan juga erosi tanah. Contoh: Proyek rehabilitasi lahan basah diberbagai negara dalam rangka pengurangan risiko banjir.
- g. Sistem Peringatan Dini dan Infrastruktur Pendukung (*Early Warning Systems and Supporting Infrastructure*), yang berfungsi untuk pemberitahuan kepada

masyarakat dan otoritas tentang kemungkinan akan terjadi bencana banjir serta infrastruktur ini juga membantu dalam memberi respon bencana yang cepat dan koordinasi evakuasi. Contoh: Sistem Teknologi peringatan dini Banjir di Jepang.



Gambar 5.11. Infrastruktur dalam manajemen banjir
(Sumber : Meliala, L, 2024)

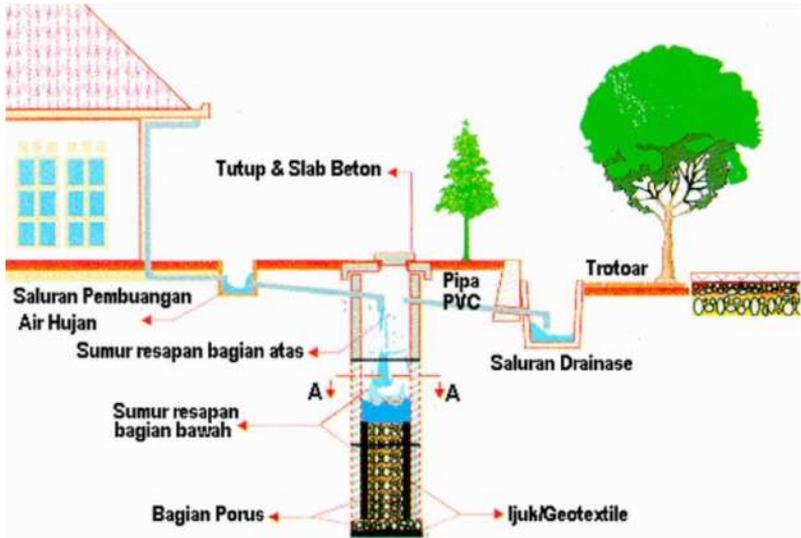


Gambar 5.12. Model Pembangunan Ramah Lingkungan
(Sumber : Meliala, L, 2024)

2. Rekayasa Lingkungan

Upaya struktural melalui rekayasa lingkungan dalam manajemen banjir, berupa:

- a. Penghijauan kembali daerah tangkapan air, yang berfungsi untuk meningkatkan penyerapan air (*Infiltrasi*), mengurangi erosi tanah, mengatur aliran air (*Flow Regulation*), meningkatkan kualitas air, menjaga keseimbangan ekosistem, penyimpanan karbon, meningkatkan ketahanan terhadap perubahan iklim, dan meningkatkan keberlanjutan serta pemanfaatan sumber daya alam. Contoh: daerah hujan tropis yang terdapat vegetasi penahan air di daerah hulu sungai akan dapat mengurangi debit aliran air yang menyebabkan banjir pada daerah hilir sungai.
- b. Pengelolaan daerah aliran sungai (DAS) secara terpadu, berfungsi untuk peningkatan pengelolaan SDA, pengurangan risiko banjir, perlindungan kualitas air, pengelolaan erosi dan sedimentasi, perlindungan keanekaragaman hayati, peningkatan kesejahteraan masyarakat, pencegahan dan mitigasi bencana alam, peningkatan pengelolaan tata ruang, pengelolaan air tanah, dan peningkatan kolaborasi antar pemangku kepentingan. Contoh: Pembentukan forum DAS yang melibatkan seluruh *Stakeholder* terkait.
- c. Pembangunan kolam retensi dalam menampung air sementara, dimana fungsinya untuk mengurangi risiko banjir, menampung air limbah, meningkatkan pengelolaan SDA, meningkatkan kualitas air, dan menstabilkan system drainase. Contoh: Pembangunan kolam Retensi Sunter untuk pengendalian banjir di Jakarta.



Gambar 5.13. Sumur Resapan (*Infiltration Well*)
(Sumber : Kusdiawan, W, 2021)

5.3.2 Upaya Non-Struktural

1. Pengaturan Tata Ruang

Upaya Non-struktural melalui pengaturan tata ruang dalam manajemen banjir, berupa:

- a. Zonasi atau pembagian wilayah rawan banjir, akan dapat membantu dalam menentukan penggunaan lahan yang tepat terutama pada wilayah yang rawan banjir dapat diprioritaskan untuk lahan yang lebih rendah risikonya, seperti ruang terbuka hijau (RTH) atau lahan pertanian dan wilayah yang aman diperuntukkan untuk lahan pemukiman.
- b. Larangan atau pembatasan pembangunan di wilayah rawan banjir, dimana pemerintah menetapkan regulasi kebijakan terkait larangan pembangunan di daerah rawan banjir dengan tujuan mengurangi jumlah bangunan yang berdampak risiko rusak akibat banjir, serta sebagai pencegahan terjadinya pemadatan lahan yang dapat memperburuk drainase perkotaan.
- c. Pengaturan sistem drainase dan pengelolaan SDA, dimana dalam tata ruang yang baik harus mencakup

penyediaan sistem drainase yang efektif, pengelolaan saluran air dan sungai, serta perlindungan terhadap daerah tangkapan air (*Catchment areas*). Pengelolaan yang buruk terhadap DAS akan dapat menyebabkan banjir melalui peningkatan debit air pada sungai.

- d. Pengembangan Ruang Terbuka Hijau (RTH), dimana pemanfaatannya sebagai kawasan resapan air dalam mengurangi genangan banjir terutama didaerah perkotaan yang padat penduduk.
- e. Perencanaan pemukiman yang tepat, dimana perencanaan pemukiman yang jauh dari wilayah rawan banjir dengan memperhatikan ketinggian tanah serta sistem pengelolaan air agar dapat dikurangi dampak banjir.
- f. Edukasi dan peningkatan kesadaran masyarakat melalui pelatihan, penyuluhan dan kegiatan pengabdian lainnya.

2. Sistem Peringatan Dini

Upaya Non-struktural melalui sistem peringatan dini dalam manajemen banjir, berupa:

- a. Pemetaan risiko dan pemantauan kondisi hidraulika, seperti; kondisi curah hujan, sungai, dan debit air yang real-time melalui pemanfaatan teknologi sensor dan stasiun cuaca agar dapat mengidentifikasi potensi banjir lebih dini dan peringatan dini kepada masyarakat sekitar.
- b. Peringatan dini berbasis teknologi, seperti; sensor aliran dan curah hujan, aplikasi peringatan dini, sistem permodelan dan prediksi banjir.
- c. Sistem peringatan dini berbasis komunikasi, seperti; layanan pesan singkat (SMS), sirine dan sistem suara, serta media sosial (facebook, Instagram, whatsapp).
- d. Pemberdayaan masyarakat dan edukasi, seperti; simulasi banjir dan edukasi tentang tanda-tanda alam melalui pelatihan dan penyuluhan kepada masyarakat.
- e. Koordinasi antar instansi yang terlibat, seperti; Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD), Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), serta

pemerintah local dan polisi yang berperan dalam proses penyelamatan dan evakuasi.



Gambar 5.14. Sistem Peringatan Dini Bencana Digital DPIS
(Sumber : Bisik, 2024)

3. Edukasi dan Kesadaran Publik

Upaya Non-struktural melalui edukasi dan kesadaran publik dalam manajemen banjir, berupa:

- Pendidikan tentang risiko dan dampak banjir, seperti; sosialisasi melalui media massa dan media sosial (medsos), program Pendidikan di sekolah-sekolah, dan penyuluhan di tingkat komunitas skala kelurahan atau desa untuk memberikan informasi langsung kepada masyarakat mengenai mitigasi bencana.
- Peningkatan kesadaran tentang mitigasi banjir, melalui penerapan teknologi ramah lingkungan, pengelolaan sampah dengan benar, dan menjaga kebersihan serta kelestarian sungai.
- Penyuluhan mengenai peran pemerintah dan Lembaga terkait, meliputi; penyuluhan mengenai sistem peringatan dini, dan keikutsertaan masyarakat dalam pengambilan keputusan,
- Kampanye pengurangan kerusakan infrastruktur dan pemukiman, seperti: Pembinaan pembangunan rumah

yang tahan terhadap banjir, dan penyuluhan tentang pemilihan lokasi yang aman dari banjir.

- e. Penyuluhan kepada Pengelola Sumber Daya Alam dan Pihak Swasta, melalui upaya mendorong perusahaan untuk berkontribusi dalam mitigasi banjir, dan menjaga kelestarian hutan dan lahan resapan air.
- f. Menggunakan media sosial dan teknologi untuk penyebaran informasi agar penyebaran informasi lebih efektif dan dapat menjangkau lebih banyak orang.

5.4 Mitigasi Risiko Banjir

Berdasarkan Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), Mitigasi risiko banjir merupakan segala upaya yang dilakukan dalam mengurangi atau menghilangkan dampak dari suatu bencana, baik melalui struktur fisik (pembangunan infrastruktur pengendali banjir) maupun non-struktural (penyuluhan, edukasi, dan kebijakan perencanaan wilayah).

Mitigasi banjir meliputi serangkaian tindakan yang bertujuan mengurangi risiko dan dampak dari banjir melalui pengaturan tata ruang yang bijaksana, pengelolaan SDA dan infrastruktur yang baik, serta pemberdayaan masyarakat (Soetomo, 2008).

5.4.1 Pendekatan Mitigasi

1. Mitigasi Struktural

Pendekatan mitigasi struktural dalam mitigasi risiko banjir merupakan serangkaian tindakan perbaikan maupun pembangunan infrastruktur fisik dalam mengurangi dampak banjir dengan tujuan mengelola aliran air, melindungi daerah rawan banjir, dan mengurangi kerusakan dari dampak banjir. Pendekatan ini berupa:

- a. Pembangunan Tanggul (*Dams*), difungsikan untuk menahan air sungai agar tidak meluap ke daerah pemukiman dan lahan pertanian.
- b. Pembangunan saluran drainase, difungsikan untuk mengalirkan air hujan atau air permukaan ketempat pembuangan akhir atau ke sungai dalam mencegah genangan air akibat curah hujan tinggi.

- c. Normalisasi sungai (*River Normalization*), meliputi pelebaran alur sungai atau pengerukan untuk peningkatan kapasitas aliran air dan pencegahan luapan air sungai.
- d. Pembuatan retensi atau waduk (*Retention Basins*), difungsikan untuk tempat penampungan atau penyimpanan air hujan yang berlebih agar tidak langsung terbuang ke sungai yang menyebabkan banjir.
- e. Pembangunan penghalang atau brikade, berupa struktur pengaman atau dinding penahan tebing yang dibangun di daerah-daerah rawan banjir untuk melindungi pemukiman atau fasilitas-fasilitas penting dari luapan air.
- f. Reklamasi dan peningkatan kapasitas penyerapan air, melalui pembangunan daerah resapan air (kolam retensi atau waduk).
- g. Pembangunan sistem peringatan dini (*Early Warning System*), difungsikan untuk pemantauan curah hujan, status level sungai yang tinggi, dan kenaikan debit air agar masyarakat mendapatkan informasi lebih awal.
- h. Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS), seperti pemeliharaan daerah resapan air melalui penataan hutan dan vegetasi di sepanjang sungai dengan tujuan untuk menyerap air hujan agar mengurangi potensi terjadinya banjir.
- i. Revitalisasi dan Pembangunan Infrastruktur Hijau (*Green Infrastructure*), seperti pembangunan Ruang Terbuka Hijau (RTH), vegetasi sepanjang sungai, dan taman serapan air dalam rangka mengurangi kelebihan aliran air permukaan (*Surface runoff*).
- j. Rehabilitasi hutan dan pengendalian erosi, dengan tujuan mengurangi jumlah sedimentasi yang mempersempit aliran sungai dan juga memperlambat aliran air hujan serta meningkatkan penyerapan air.



Gambar 5.15. Tanggul Laut terbesar di Indonesia
(Sumber : Pujiyanto, T.N, 2024)

2. Mitigasi Non-Struktural

Pendekatan mitigasi non-struktural dalam mitigasi risiko banjir merupakan upaya mengurangi dampak banjir dan risikonya dengan tidak melibatkan pembangunan fisik, dimana fokus pada kebijakan, pengelolaan SDA, perencanaan serta kesadaran masyarakat akan bencana banjir. Pendekatan ini berupa:

- a. Perencanaan tata ruang yang bijaksana, dimana perencanaan wilayah yang mempertimbangkan potensi banjir dan menentukan zonasi risiko banjir untuk pembangunan seperti, diluar wilayah sempadan sungai, diluar wilayah rawan banjir.
- b. Pendidikan dan penyuluhan masyarakat, melalui peningkatan kesadaran masyarakat dan pelatihan mitigasi berbasis masyarakat.
- c. Sistem peringatan dini (*Early Warning System*), melalui penerapan atau implementasi agar masyarakat dapat melakukan evakuasi dan pencegahan, serta sosialisasi sistem peringatan dini lewat medsos atau teknologi lainnya.
- d. Pengelolaan SDA, dengan melakukan konservasi dan rehabilitasi daerah resapan air dan penanaman vegetasi agar dapat memperbaiki daya serap tanah dan mencegah erosi yang dapat mengakibatkan banjir.

- e. Perencanaan kebijakan dan regulasi dalam pengelolaan risiko banjir serta insentif dan pengawasannya.
- f. Penyusunan rencana evakuasi dan rencana darurat, serta latihan kesiapsiagaan dalam memastikan masyarakat dan pihak terkait paham akan Langkah yang diambil Ketika terjadi banjir.
- g. Pengurangan kerugian ekonomi dan sosial, dengan menyiapkan asuransi bencana dan pendampingan sosial dan ekonomi terhadap masyarakat yang terdampak pasca-banjir.
- h. Pengelolaan infrastruktur yang tahan banjir, dengan melakukan pemeliharaan terhadap tanggul, drainase, dan bangunan yang ada.
- i. Partisipasi masyarakat dalam pengelolaan risiko banjir, melalui keterlibatan komunitas dan kelompok relawan serta jaringan komunikasi masyarakat.

5.4.2 Strategi Mitigasi

1. Identifikasi dan Penilaian Risiko

Strategi mitigasi melalui identifikasi dan penilaian risiko dalam mitigasi risiko banjir merupakan Langkah awal yang cukup penting dalam mengurangi dampak bencana banjir. Adapun aspek utama dalam strategi mitigasi ini adalah:

- a. Identifikasi risiko banjir, dengan penentuan wilayah rawan banjir, identifikasi faktor pemicu banjir, dan mencatat karakteristik banjir untuk mengetahui perkembangan banjir dan seberapa besar dampak dari banjir tersebut.
- b. Penilaian risiko banjir, dimana komponen utama penilaian adalah penilaian kemungkinan (Probabilitas), dan penilaian dampak (*Impact Assessment*) terhadap sosial, ekonomi, lingkungan dan psikososial, serta pemetaan risiko banjir.
- c. Evaluasi dan penentuan tingkat risiko, dimana kategori risikonya tinggi, sedang, dan rendah dengan tujuan prioritas tindakan mitigasi.

- d. Integrasi dengan perencanaan tata ruang, dengan tujuan menghindari pembangunan pemukiman di Kawasan risiko tinggi, dan menetapkan Kawasan resapan air atau ruang terbuka hijau (RTH).
- e. Penyusunan rencana mitigasi banjir berdasarkan hasil penilaian risiko, dengan tujuan menentukan langkah yang diambil dalam pembangunan infrastruktur, peningkatan kesiapsiagaan, dan kebijakan pengelolaan SDA.
- f. Monitoring dan evaluasi berkala, dikarenakan faktor-faktor yang mungkin terjadi seperti, perubahan iklim, kondisi cuaca, dan perubahan lahan yang bisa sewaktu-waktu berubah sehingga dapat mempengaruhi tingkat risiko banjir.
- g. Keterlibatan masyarakat dalam identifikasi dan penilaian risiko dikarenakan masyarakat kadang mempunyai pengetahuan yang bermanfaat mengenai pola banjir karena hidup bertahun-tahun diwilayah tersebut.

2. Pengurangan Risiko

Strategi mitigasi melalui pengurangan risiko dalam mitigasi risiko banjir merupakan pendekatan dengan tujuan mengurangi potensi dan dampak banjir terhadap masyarakat, infrastruktur, dan lingkungan. Adapun strategi mitigasi dengan pengurangan risiko adalah:

- a. Pengelolaan SDA dan konservasi lingkungan, dengan melakukan reboisasi dan penghijauan, konservasi daerah resapan air, dan pengelolaan erosi.
- b. Perencanaan tata ruang dan pengelolaan lahan, melalui zonasi risiko banjir, dan pengaturan penggunaan lahan.
- c. Pembangunan infrastruktur pengeendalian banjir, seperti pembangunan dan perbaikan sistem drainase, pembuatan tanggul dan bendungan, pembangunan kolam retensi atau waduk, serta rehabilitasi dan pemeliharaan infrastruktur yang ada.
- d. Peningkatan sistem peringatan dini, seperti : sistem peringatan dini banjir (*Early Warning System*), Pendidikan dan pelatihan masyarakat.

- e. Penguatan kesiapsiagaan dan kapasitas masyarakat, melalui pembuatan rencana darurat dan evakuasi, serta latihan simulasi banjir.
- f. Pemberdayaan ekonomi dan sosial masyarakat, dengan penerapan program asuransi banjir, dan pembangunan infrastruktur yang tahan banjir.
- g. Kebijakan pengelolaan air dan kualitas lingkungan, dengan pengelolaan SDA, dan pengendalian pencemaran terhadap sungai dan saluran air lainnya.
- h. Mengintegrasikan pengurangan risiko banjir dalam kebijakan dan perencanaan, dengan perencanaan jangka Panjang, dan kolaborasi antara pemerintah dan masyarakat dalam meningkatkan efektivitas pengurangan risiko banjir.

3. Peningkatan Kesiapan Masyarakat

Strategi mitigasi melalui pengurangan risiko dalam mitigasi risiko banjir merupakan pendekatan dengan tujuan mengurangi potensi dan dampak banjir terhadap masyarakat, infrastruktur, dan lingkungan. Adapun strategi mitigasi dengan pengurangan risiko adalah:

- a. Pengelolaan SDA berkelanjutan dan konservasi lingkungan, dengan melakukan reboisasi dan penghijauan, konservasi daerah resapan air, dan pengelolaan erosi.
- b. Perencanaan tata ruang dan pengelolaan lahan, melalui zonasi risiko banjir, dan pengaturan penggunaan lahan.

DAFTAR PUSTAKA

- Asosiasi Pendamping Perempuan Usaha Kecil Mikro, (2022). Perubahan Iklim Ancaman Nyata, Saatnya Bertindak!. Link: <https://asppuk.or.id/2022/08/perubahan-iklim-ancaman-nyata-saatnya-bertindak/>
- Bisik. (2024). *Kominfo Luncurkan Sistem Peringatan Dini Bencana Digital DPIS*. Penerbit: Bisik (Berita Untuk Semua). Link: <https://www.bisik.id/read/kominfo-luncurkan-sistem-peringatan-dini-bencana-digital-dpis-1727105485931>
- Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill Book Company. Link: https://ponce.sdsu.edu/Applied_Hydrology_Chow_1988.pdf
- Farah, N, (2022). *Apa itu deforestasi? Cari Tahu Lebih Lanjut Tentang Deforestasi, Yuk!*. ECONUSA (Nature-Culture-Conservation): Eco Journalism. Link: <https://econusa.id/id/ecodefender/lebih-lanjut-tentang-deforestasi/>
- Guru Geografi. (2017). *Anomali Cuaca: El Nino dan La Nina*. Link: <https://www.gurugeografi.id/2017/01/anomali-cuaca-el-nino-dan-la-nina.html>
- International Rivers, (2023). *International Rivers Annual Report*. Link: <https://www.internationalrivers.org/wp-content/uploads/sites/86/2024/08/2023-IR-Annual-Report-website-compressed.pdf>
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Retrieved from <https://www.ipcc.ch>.
- Jaya, A. (2021). *Dampak Perubahan Iklim Global*. Artikel, Program Studi Pengelolaan Sumberdaya Alam dan lingkungan, Program Pascasarjana, Universitas Palangkaraya. Link: <https://kompasmu.github.io/tulisan/post/bencana-alam-yg-disebabkan-oleh-perubahan-cuaca-disebut/>
- Joe Cortez, (2024). *Storm water & pollution prevention*. Turlock Journal. City of Turlock Municipal Services Department. Link: <https://www.turlockjournal.com/news/government/storm-water-pollution-prevention/>

- Kennial Laia. (2024). Hutan Tropis Indonesia Hilang 292 ribu Hektare pada 2023. Penerbit: BETAHITA, Jakarta. Link: <https://www.betahita.id/news/detail/10095/hutan-tropis-indonesia-hilang-292-ribu-hektare-pada-2023.html?v=1718701106>
- KLHK. (2020). Hutan dan Deforestasi Indonesia Tahun 2019. Jakarta: Kementerian LHK. Link: [https://ppid.menlhk.go.id/siaran_pers/browse/2435%20%20\(23](https://ppid.menlhk.go.id/siaran_pers/browse/2435%20%20(23)
- Kusdiawan, W. (2021). *Langkah Konkrit Solusi Penanganan Banjir*. Penerbit: Redaksi KUMPARAN. Jakarta Selatan. Link: <https://kumparan.com/wawan-kusdiawan/langkah-konkrit-solusi-penanganan-banjir-1vFbmu8X0zP/2>.
- Lambin, E.F. and Geist, H.J. (2006). *Land Use and Land Cover Change-Local Processes and Global Impacts*. Springer Publication, 222.
- Lingga, R.A, (2024). *Curah hujan tinggi dan sistem drainase buruk penyebab banjir di Tangerang Selatan*. Penerbit: ANTARA. Link: <https://www.antaraneews.com/foto/3903150/curah-hujan-tinggi-dan-sistem-drainase-buruk-penyebab-banjir-di-tangerang-selatan>.
- Meliala, L. (2024). *Solusi Berbasis Alam untuk Pengelolaan Risiko Banjir Perkotaan*. Kementerian PPN/Bappenas: Low Carbon Development Indonesia. Link: <https://lcdi-indonesia.id/2024/02/05/solusi-berbasis-alam-untuk-pengelolaan-risiko-banjir-perkotaan/>.
- Pujianto, T.N. (2024). *Mega Proyek Tanggul Laut Terbesar di Dunia, Salah Satunya di Indonesia*. Penerbit: Time News, Jakarta. Link: <https://www.timenews.co.id/hiburan/99513260680/mega-proyek-tanggul-laut-terbesar-di-dunia-salah-satunya-di-indonesia>
- Schneider, J et al. (2009). *Land cover classification of tundra environments in the Arctic Lena Delta based on Landsat 7 ETM+ data and its application for upscaling of methane emissions*. Remote Sensing of Environment, 113(2), 380-391, Link: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.10.013>.

- Sigit, R.R. (2014). *Tutupan Hijau di Kawasan Puncak Berkurang, Sumber Mata Air Menghilang*. MONGABAY (Berita Lingkungan). Link: <https://www.mongabay.co.id/2014/05/02/tutupan-hijau-di-kawasan-puncak-berkurang-sumber-mata-air-menghilang/>
- Smith, K., & Ward, R. (1998). *Floods: Physical Processes and Human Impacts* (337 p). New York: John Wiley.
- Soetomo, (2008). *Masalah Sosial Dan Upaya Pemecahannya*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- Speak Indonesia. (2021). *SUNGAI CODE: Contoh Keberhasilan Penataan Kawasan Sempadan Sungai*. SPEAK INDONESIA, Jakarta. Link: <https://speakindonesia.org/kegiatan/sungai-code-contoh-keberhasilan-penataan-kawasan-sempadan-sungai/>
- Suripin. (2004). *Sistem Drainase Perkotaan yang Berkelanjutan. Edisi Pertama*. Yogyakarta : Penerbit Andi Offset.
- Wang L, et al. (2017). *The inhibition of protein translation mediated by AtGCN1 is essential for cold tolerance in Arabidopsis thaliana*. *Plant Cell Environ* 40(1):56-68.
- World Bank. (2022). *The World Bank Annual Report 2022: Helping Countries Adapt to a Changing World*. © Washington, DC : World Bank. Link: <http://hdl.handle.net/10986/37972>.
- World Meteorological Organization. (2023). *WMO annual report highlights continuous advance of climate change*. Link: <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-annual-report-highlights-continuous-advance-of-climate-change>.
- World Water Forum, (2022). 9th World Water Forum, Dakar 2022 "Water Security for Peace and Development". World Water Council, Senegal. Link: <https://www.worldwatercouncil.org/en/dakar-2022>.
- Wisner, B, et al. (2004). *At Risk: Natural Hazards*. Publisher: Routledge. Link: https://www.researchgate.net/publication/245532449_At_Risk_Natural_Hazards
- Yuniarto, T, (2023). *Fenomena Banjir di Jakarta*. KOMPAS Pedia. Link: <https://kompaspedia.kompas.id/baca/paparan-topik/fenomena-banjir-di-jakarta>.

Zulfan, J, Ginting, B.M, dan Rimawan, R. (2023). *Assessment of Reservoir Sedimentation and Mitigation Measures using 2D Hydrodynamic Modeling: Case Study of Pandanduri Reservoir, Indonesia*. International Conference on Civil and Environmental Engineering. IOP Publishing, 1135 (2023) 012018, pp.1-10 Link: doi:10.1088/1755-1315/1135/1/012018

BAB 6

ADAPTASI PERUBAHAN IKLIM DALAM TEKNIK SUNGAI

Oleh Ganisa Elsinia Salamena

Laporan perubahan iklim oleh *The Intergovernmental Panel on Climate Change* menandai kejadian iklim ekstrim yang telah dirasakan secara nyata oleh hampir seluruh belahan bumi. Salah satu aspek iklim terdampak adalah ketersediaan air pada musim kering dan berlebihnya air di saat musim basah (ISAP2023, 2023). Kajian yang intensif perlu dilakukan dengan berbagai metode empirik, simulasi dengan memperhatikan kondisi global, nasional, dan wilayah untuk menganalisis perubahan iklim. Dalam lingkup sumber daya air dampak perubahan iklim teridentifikasi dari beberapa indikator diantaranya kualitas air, erosi sedimentasi, kondisi vegetasi, penggunaan lahan, kondisi ekosistem, dan kegiatan manusia (Popi, 2014). Penggunaan air pada abad ini menjadi tantangan yang utama. Penggunaan air di sektor pertanian harus diupayakan dengan teknologi mumpuni untuk mengoptimalkan produktivitas tanaman. Adaptasi dalam pengembangan strategi baru yang menjunjung ketahanan iklim adalah kunci. Teknologi pintar menjadi salah satu solusi yang diadaptasi negara berkembang (Patle, Kumar and Khanna, 2020). Pada BAB ini akan diuraikan adaptasi perubahan iklim berdasarkan indikator adaptasi yang telah tersebut diatas, dan diuraikan strategi teknologi pintar terintegrasi yang dapat diterapkan.

Kondisi daerah aliran sungai (DAS) dapat sangat bervariasi tergantung pada banyak faktor, termasuk geografi, iklim, penggunaan lahan, dan tingkat pengelolaan. Berikut adalah beberapa aspek utama yang sering memengaruhi kondisi DAS:

6.1 Kualitas Air

Berbagai data yang dikumpulkan merujuk bahwa kualitas air tercemar hampir di berbagai wilayah, sebagai contoh wilayah Asia, pada DAS Mekong yang melintasi Cina, Myanmar, Laos, Thailand, Cambodia, and Vietnam. DAS Mekong mengalami perubahan secara progresif pada aliran sungai, sehingga diprediksi perubahan ekstrim ini akan menunjang permasalahan untuk setiap musim. Pada musim panas DAS Mekong akan mengalami banyak masukan kontaminan yang memperburuk kondisi kualitas air pada DAS Mekong (Whitehead *et al.*, 2019). Kasus di Indonesia terdapat juga banyak sungai yang tidak memenuhi baku mutu air. Pada musim kemarau, pada sungai-sungai yang terdapat kegiatan industri, peternakan, pertanian, maupun kegiatan domestik menunjukkan status tercemar berat. Penggambaran indeks pencemar kategori berat di musim hujan tertinggi terdapat pada hilir sungai diakibatkan oleh limbah domestik (Nufutomo, 2022). Berdasarkan kondisi sungai pada kasus diatas, tergambar proses pencemaran sungai secara masif, mengimplikasikan bahwa perlu ada adaptasi terhadap situasi kualitas sungai yang buruk. Untuk menghadapi situasi ini terdapat beberapa langkah yang dapat dirumuskan. Untuk adaptasi perubahan kualitas, maka setiap peruntukan perlu dilakukan pengolahan kualitas air sebelum digunakan. BOD dan COD sebagai parameter pencemaran perlu diperhatikan dalam pengolahan kualitas air (Haryanto *et al.*, 2021).

Langkah preventif untuk memperlambat maupun menghentikan proses pencemaran perlu diterapkan. Terlepas dari meningkatnya dampak perubahan iklim terhadap kualitas air, pengembangan dan implementasi langkah-langkah adaptasi strategis jangka panjang jarang menjadi prioritas pemerintah. Sejauh ini, penelitian terutama cenderung berfokus pada ketersediaan dan volume air daripada kualitas. Relatif lebih sedikit penelitian yang mempertimbangkan strategi adaptasi yang menangani ketidakpastian dampak perubahan iklim terhadap kualitas badan air (Ortiz *et al.*, 2021). Peningkatan Kapasitas Pengelolaan kualitas air harus diperkuat dari segi perencanaan, pemantauan, dan pengukuran, serta dalam hal

peningkatan kapasitas. Di bawah kerangka perencanaan sumber daya air, sistem perencanaan kualitas air yang efisien dan efektif harus dikembangkan. Saat ini, perencanaan kualitas air dibagi menjadi rencana perlindungan sumber daya air dan rencana pengendalian pencemaran air, yang membagi proses pengelolaan kualitas air. Sistem perencanaan kualitas air yang terintegrasi harus dirumuskan sebagai gantinya (Shen, 2021).

6.2 Erosi dan Sedimentasi

Erosi tanah diperkirakan akan dipengaruhi oleh perubahan iklim. Perubahan iklim dalam pola suhu dan curah hujan akan berdampak pada produksi biomassa tanaman, laju infiltrasi, kelembaban tanah, penggunaan lahan dan pengelolaan tanaman, dan karenanya mempengaruhi limpasan dan erosi tanah. Hubungan erat antara perubahan iklim dan erosi tanah telah diamati dalam beberapa dekade terakhir (Li and Fang, 2016). Berdasarkan tinjauan sistematis dari 224 studi di seluruh dunia, telah disimpulkan bahwa erosi tanah diproyeksikan meningkat secara global di bawah perubahan iklim. Dengan merangkum studi kasus di seluruh dunia dan memperhitungkan ketidakpastian metode yang diterapkan didapat *trend* erosi tanah yang meningkat diproyeksikan menjelang akhir abad ini yang akan menyebabkan degradasi lahan lebih lanjut, terutama di lingkungan semi-kering. Peningkatan erosi tanah dapat diperparah lebih lanjut oleh perubahan penggunaan lahan yang ditandai dengan ekspansi pertanian dan deforestasi. Implikasi kondisi ini menekankan kebutuhan mendesak untuk konservasi tanah dan perencanaan penggunaan lahan terpadu yang bertujuan untuk mengurangi kehilangan kehumusan tanah (Eekhout and de Vente, 2022).

Secara konseptual dan teoritis untuk evolusi lanskap muka bumi menunjukkan bahwa topografi fluvial sensitif terhadap iklim. Namun, tetap sulit untuk menunjukkan hubungan yang menarik antara topografi fluvial dan iklim di lanskap alam. Salah satu alasan yang mungkin adalah bahwa banyak penelitian membandingkan laju erosi dengan data iklim, meskipun studi teoritis menunjukkan bahwa, pada keadaan stabil, iklim dirumuskan dalam hubungan

antara laju erosi dan topografi daripada laju erosi saja. Hubungan antara laju erosi (proksi untuk laju pengangkatan batuan) dan indeks kecuraman saluran sungai yang dinormalisasi (proksi untuk relief fluvial) menjadi semakin nonlinier dengan meningkatnya curah hujan tahunan rata-rata dan penurunan kekeringan. Hal ini menunjukkan bahwa efisiensi erosi meningkat di iklim yang lebih basah dan lebih lembab, menurunkan relief fluvial untuk laju erosi tertentu (Marder and Gallen, 2023). Sayatan sungai batuan dasar hanya terjadi selama banjir yang cukup besar untuk memobilisasi sedimen dan melampaui ambang batas. Data baru yang berkaitan dengan kecuraman saluran dan laju erosi memberikan kesempatan untuk mengevaluasi peran ambang batas dan variabilitas debit dalam evolusi lanskap. Ditemukan hubungan antara kecuraman saluran dan laju erosi (DiBiase and Whipple, 2011). Baru-baru ini, pengukuran penginderaan jauh telah dilakukan yang menunjukkan bahwa sementara beberapa wilayah Bumi "kecoklatan" yang lain "menghijau". Efek terakhir diperkirakan disebabkan oleh pemupukan pertumbuhan biomassa dengan meningkatkan kadar CO₂ atmosfer, dan memang jumlah total biomassa global diamati meningkat sebesar 3,8% selama tahun 1981 - 2003. Meskipun demikian, 24% permukaan bumi telah menyebabkan beberapa tingkat degradasi dalam periode waktu yang sama. Tampaknya bahwa sementara tren jangka panjang dalam turunan NDVI (indeks vegetasi perbedaan normal) hanyalah indikator luas degradasi lahan, yang diambil sebagai proksi, tren NDVI/NPP (produktivitas primer bersih) mampu menghasilkan tolok ukur yang konsisten secara global dan untuk menerangi wilayah di mana perubahan biologis yang signifikan terjadi. Dengan demikian, perhatian dapat diarahkan ke di mana penyelidikan dan tindakan di permukaan tanah diperlukan, yaitu potensi "titik panas" degradasi dan/atau erosi lahan (Rhodes, 2014). Perubahan keseluruhan aliran sungai di masa depan diperkirakan bervariasi dari -28 hingga 28%. Hasil sedimen rata-rata tahunan yang diproyeksikan di outlet cekungan mengikuti pola yang mirip dengan yang ditunjukkan oleh curah hujan dan pembuangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyediaan teras, pagar lanau, cekungan sedimen, *check dam*, *strip filter*, dan saluran air berumput mengurangi hasil sedimen di

cekungan masing-masing sebesar 73, 66, 65, 58, 54, dan 48%. Cekungan penampung sedimen adalah pilihan paling ekonomis untuk pengelolaan erosi tanah di bawah perubahan iklim (Shrestha *et al.*, 2020).

6.3 Kondisi Vegetasi

Distribusi vegetasi global telah dipengaruhi oleh gangguan manusia dan perubahan iklim. Perubahan vegetasi masa lalu dipelajari dalam banyak penelitian sementara beberapa penelitian telah membahas kontribusi relatif gangguan manusia dan perubahan iklim pada perubahan vegetasi. Untuk memisahkan pengaruh gangguan manusia dan perubahan iklim terhadap perubahan vegetasi, dibandingkan vegetasi yang ada yang menunjukkan distribusi vegetasi di bawah pengaruh manusia dengan vegetasi potensial yang mencerminkan distribusi vegetasi tanpa pengaruh manusia (Zhang and Huang, 2019). Peristiwa ekstrem perubahan iklim memiliki dampak konsekuensial yang mempengaruhi respons dinamika vegetasi serta fungsi ekosistem dan kesejahteraan manusia yang berkelanjutan. Oleh karena itu, respons vegetasi terhadap perubahan iklim perlu dieksplorasi untuk mendorong program pengelolaan yang terorganisir secara spesifik menuju konservasi ekologi dan kebijakan restorasi yang ditargetkan terhadap berbagai ancaman iklim ekstrem. Sangat diperlukan untuk mengkaraktirikan respon vegetasi terhadap perubahan iklim untuk mengidentifikasi solusi dan teknik mendasar dalam merancang strategi untuk adaptasi dan mitigasi efektif yang ditargetkan untuk mencapai hasil perencanaan yang berkelanjutan (Afuye, Kalumba and Orimoloye, 2021). Perubahan iklim memainkan peran kunci dalam mengubah dinamika produktivitas vegetasi, yang pada akhirnya mempengaruhi siklus hidrologi daerah aliran sungai melalui evapotranspirasi (ET) (Ougahi, Cutler and Cook, 2022). Penelitian tentang peran vegetasi tangkapan air dalam siklus hidrologi memiliki sejarah panjang dalam literatur hidrologi. Hubungan antara jenis vegetasi dan evapotranspirasi tangkapan air dan limpasan terutama dinilai melalui studi tangkapan air selama abad ke-20. Hasil dari lebih dari 200 studi tangkapan air dari seluruh dunia telah dilaporkan dalam literatur. Dua kendala dalam

pemanfaatan hasil dari studi tangkapan air n di domain yang lebih luas adalah bahwa daerah tangkapan air yang diteliti umumnya (1) kecil (<10 km²) dan (2) dari rentang jenis iklim yang sempit. Sebagian besar studi tangkapan air yang dilaporkan berlokasi di Amerika Serikat (~47%) dan Australia (~27%) dan mengalami penurunan terutama jenis iklim sedang dan dingin (Peel, McMahon and Finlayson, 2010). Adaptasi berbasis groforestry (AF) terhadap perubahan iklim global dapat terdiri dari pembalikan tren negatif pada beragam tutupan pohon sebagai strategi manajemen risiko portofolio generik, pergeseran sumber daya yang ditargetkan, strategis (misalnya cahaya, air) untuk menyesuaikan dengan perubahan kondisi (misalnya curah hujan yang lebih rendah atau lebih variabel, suhu yang lebih tinggi), pengaruh berbasis vegetasi pada pola curah hujan atau adaptif, taktis, manajemen interaksi tanaman-tanaman berdasarkan prakiraan cuaca untuk musim tanam berikutnya. (van Noordwijk *et al.*, 2021).

6.4 Penggunaan Lahan

Korelasi antara perubahan iklim global dan ekosistem terestrial merupakan salah satu subjek inti dalam penelitian ilmiah tentang perubahan iklim global. Menurut laporan AR5 Panel antar negara tentang Perubahan Iklim (IPCC), antara periode 1983 hingga 2012, dunia mengalami periode 30 tahun terpanas di belahan bumi utara dalam 800 tahun terakhir (Li *et al.*, 2019). Perubahan iklim yang drastis ini berdampak signifikan pada vegetasi. Banyak Tujuan Pembangunan Berkelanjutan, termasuk nol kelaparan, ketersediaan air bersih, mempertahankan kehidupan di darat dan di air, dan aksi iklim, dipengaruhi oleh sistem produksi pangan global dan pemeliharaan keanekaragaman hayati di dalam dan di sekitar lahan pertanian. Oleh karena itu, menjaga keanekaragaman hayati sekaligus mendukung ketahanan pangan adalah kunci untuk memenuhi tujuan ini. Dampak buruk dari variabilitas dan perubahan iklim sebagian besar dirasakan oleh petani kecil dan sistem pertanian petani kecil di mana pertanian tadah hujan dominan. Ketergantungan yang berkelanjutan pada pertanian tadah hujan telah menyebabkan penurunan produktivitas tanaman dan gagal panen dalam banyak kasus karena pola cuaca bergeser yang

sangat bermasalah bagi pertumbuhan tanaman. Agroforestri yang merupakan salah satu praktik cerdas iklim, ramah lingkungan dan agroekologi telah ditemukan untuk mengurangi kesulitan perubahan iklim sambil mendorong adaptasi, meningkatkan ketahanan dan melemahkan kerentanan terutama dalam sistem pertanian petani kecil (Awazi, 2022). Perubahan iklim dan tata guna lahan berdampak pada siklus hidrologi yang mengakibatkan perubahan hasil air tangkapan air dan karakteristik aliran sungai. Memahami efek gabungan dari perubahan iklim dan tata guna lahan terhadap air sangat penting untuk mengembangkan rencana sumber daya air yang berkelanjutan. Sebagian besar penelitian hanya mempertimbangkan efek terisolasi dari iklim saja atau penggunaan lahan saja, dan ini dapat membelokkan gambaran respons hidrologi dengan mengaitkan terlalu sedikit atau terlalu penting pada perubahan iklim atau penggunaan lahan. Mengukur dampak gabungan dari perubahan iklim dan tata guna lahan merupakan tantangan yang signifikan karena hasil air adalah konvolusi dari kedua faktor ini (Zhang *et al.*, 2018). Efek penggunaan lahan/tutupan lahan dan perubahan iklim pada hidrologi dan proses erosi tanah menjadi perhatian utama, terutama di daerah tropis yang lembab. Pendekatan sistem pemodelan simulasi optimasi terpadu dikembangkan untuk menilai strategi adaptif dalam menanggapi dampak gabungan dari variasi iklim dan tata guna lahan. Sistem ini tidak hanya dapat mencerminkan tren hidrologi di masa depan di bawah lingkungan yang berubah, tetapi juga memberikan rencana alokasi air di bawah berbagai ketidakpastian yang dinyatakan sebagai fitur acak atau kabur secara sistematis (Li *et al.*, 2021).

6.5 Kondisi Ekosistem

Kesehatan ekosistem DAS dapat diukur dari keberagaman spesies ikan, flora riparian, dan mikroorganisme yang hidup di dalamnya. Kerusakan pada habitat seperti perusakan hutan bakau atau perubahan saluran sungai dapat mengurangi habitat bagi berbagai spesies. Perubahan iklim antropogenik yang cepat yang dialami pada awal abad kedua puluh satu terkait erat dengan kesehatan dan fungsi biosfer. Perubahan iklim berdampak pada

ekosistem melalui perubahan kondisi rata-rata dan variabilitas iklim, ditambah dengan perubahan terkait lainnya seperti peningkatan pengasaman laut dan konsentrasi karbon dioksida atmosfer. Ini juga berinteraksi dengan tekanan lain pada ekosistem, termasuk degradasi, defaunasi, dan fragmentasi. Ada kebutuhan untuk memahami dinamika ekologis dari dampak iklim ini, untuk mengidentifikasi hotspot kerentanan dan ketahanan dan untuk mengidentifikasi intervensi manajemen yang dapat membantu ketahanan biosfer terhadap perubahan iklim. Pada saat yang sama, ekosistem juga dapat membantu dalam mitigasi, dan adaptasi terhadap perubahan iklim (Malhi *et al.*, 2020).

Bukti dari eksperimen skala lokal dan studi observasional telah mengungkapkan efek stabilisasi keanekaragaman hayati pada fungsi ekosistem. Penggabungan data tentang distribusi lebih dari 57.500 spesies tanaman dan pengamatan penginderaan jauh di seluruh Belahan Bumi Barat untuk menyelidiki peran berbagai aspek keanekaragaman tumbuhan (kekayaan spesies, keanekaragaman filogenetik, dan keanekaragaman fungsional) dalam memediasi sensitivitas ekosistem terhadap variabilitas iklim pada skala regional selama 20 tahun terakhir. Menunjukkan bahwa, di beberapa bioma, wilayah dengan keanekaragaman tanaman yang lebih besar menunjukkan sensitivitas yang lebih rendah (lebih stabil dari waktu ke waktu) terhadap variabilitas suhu pada skala antartahunan dan musiman. Sementara daerah-daerah ini dapat menunjukkan sensitivitas yang lebih rendah terhadap variabilitas curah hujan antartahunan, mereka muncul sebagai sangat sensitif terhadap musiman curah hujan (Oliveira, Moore and Dong, 2022). Melestarikan hutan dengan keanekaragaman yang lebih besar dapat membantu menstabilkan fungsi ekosistem di bawah perubahan iklim, mungkin mengamankan penyediaan layanan ekosistem terkait produktivitas yang berkelanjutan kepada manusia.

6.6 Kegiatan Manusia

Penggunaan Air Ekstraksi air untuk keperluan pertanian, industri, dan domestik dapat mengurangi aliran sungai dan mempengaruhi ekosistem. Pembangunan pemukiman dan infrastruktur dapat mengubah pola aliran air dan meningkatkan

risiko pencemaran. Masalah kualitas air sungai yang tercemar merupakan bagian dari permasalahan lingkungan saat ini. Banyak polusi yang disebabkan oleh limbah pabrik industri, limbah rumah tangga, dan sampah. Hal ini menyebabkan kondisi ekosistem sungai menurun dan merugikan manusia dan lingkungan. Pencemaran yang terjadi di sungai merupakan akibat dari perilaku manusia yang semakin mengabaikan lingkungan sekitar. Konsekuensi dari perilaku manusia yang salah dalam memperlakukan lingkungan sungai pada akhirnya akan menjadi bencana yang merugikan manusia itu sendiri (Yanti, Aprihatin and Armaita, 2024). Perubahan iklim dan aktivitas manusia bersama-sama telah mengubah rezim hidrologi sungai dan akibatnya mengancam kesehatan ekosistem sungai. Mengukur dampak perubahan iklim dan aktivitas manusia terhadap rezim kesehatan hidrologi sungai sangat penting untuk pengelolaan sumber daya air dan perlindungan ekologi sungai. Dampak aktivitas manusia pada sistem sungai telah mencapai keadaan di mana mereka tidak dapat lagi dikendalikan hanya oleh proses alami bumi tetapi juga perlu adanya kekuatan antropogenik di banyak wilayah di dunia.

Ekosistem sungai, yang bertindak sebagai saluran penting yang menghubungkan alam darat, laut, dan atmosfer, telah menghadapi gangguan yang signifikan karena eksploitasi sumber daya manusia mereka. Beberapa tahun terakhir telah menyaksikan peningkatan intensifikasi aktivitas manusia, yang berdampak buruk pada keseimbangan ekosistem air (Chen *et al.*, 2024). Dampak manusia terhadap sungai adalah proses berskala besar yang mengarah pada beragam konsekuensi negatif. Ada dampak seperti berikut: redistribusi aliran sungai dalam waktu; redistribusi aliran sungai pada ruang; pencairan aliran es; gangguan fisik dasar sungai; polusi; penyumbatan air; polusi termal. Kontaminasi air adalah tantangan yang luar biasa dan terus meningkat. Berdasarkan asalnya, tiga kelompok polutan air utama dapat dibedakan: 1) sampah kota; 2) limbah industri; 3) limbah pertanian. Penyumbatan aliran yang disebutkan sebelumnya adalah akumulasi zat asing, terutama tidak larut. Polusi termal terutama berhubungan dengan air pendingin yang dilepaskan dari stasiun pembangkit listrik. Negara-negara harus bersatu untuk menemukan solusi jangka

panjang untuk perubahan iklim dan penurunan lingkungan karena telah menimbulkan kekhawatiran di seluruh dunia. Selain itu, ada solusi yang telah disepakati oleh para peneliti yang akan meminimalkan risiko perubahan iklim dan penurunan lingkungan, seperti penghijauan, menghindari penggunaan plastik, dan daur ulang produk limbah. Oleh karena itu, kegiatan ramah lingkungan telah didorong di negara-negara di seluruh dunia.

Dengan demikian beberapa faktor yang telah disajikan diatas memiliki peran penting dalam proses perubahan DAS, untuk menghadapi kondisi yang membuat DAS semakin sakit maka langkah penghambatan kemudian ditingkatkan dalam berbagai sektor dengan berbagai kondisi iklim, yaitu:

1. Sektor Pertanian

Perubahan iklim turut mempengaruhi pertanian, sebagai contoh pada daerah tropis, tanaman sayuran serta buah-buahan tidak luput dan memberi dampak penurunan kuantitas dan kualitas produksi. Selain itu munculnya berbagai hama penyebab penyakit yang bervariasi dan baru meningkatkan potensi gagal panen. Penurunan air irigasi dari sungai menjadi masalah yang juga tidak terhindarkan. Sehingga pada daerah pertanian khususnya pada daerah dengan jenis iklim tropis diupayakan untuk menerapkan beberapa langkah adaptasi yaitu (Sarvina, 2019):

- a. Varietas toleran cekaman lingkungan turut digunakan
- b. Waktu tanam yang disesuaikan sesuai perubahan musim penghujan dan kemarau
- c. Menerapkan teknik irigasi hemat air,
- d. Mengembangkan teknologi untuk pencarian sumber daya air yang baru,
- e. Menggunakan rumah kaca/rumah plastik,
- f. Upaya meeningkatlam kemampuan para petani maupun penyuluh untuk memahami perubahan iklim melalui sekolah lapangan.
- g. Upaya di masa yang akan datang dengan mengkaji proyeksi iklim pada berbagai skenario dan variasi global circular model (gcm) serta mengkaji dampak dari perubahan iklim yang mempengaruhi tanaman sayur

dan buah unggulan dengan mengembangkan pemodelan pada sistem usaha tani. Informasi proyeksi dampak perubahan iklim diperlukan sebagai upaya adaptasi dan perencanaan pembangunan pertanian yang dikaitkan dengan perubahan iklim

- h. Dengan adanya peningkatan jumlah penduduk di Indonesia dan efek dari sebaran covid-19 pada tahun 2020, maka dikembangkan kembali program pertanian *food estate*. Strategi ini diusung oleh pemerintah Indonesia sebagai bentuk upaya mengatasi krisis pangan pada masa tersebut. Kebijakan ini sebenarnya sudah pernah dilaksanakan pada tahun 1950 untuk pengembangan pertanian skala besar untuk memenuhi kebutuhan pangan masyarakat Indonesia

2. Sektor Industri dan Teknologi

Perkembangan teknologi dan kebangkitan industri di seluruh dunia adalah situasi pemanasan global dan perubahan iklim yang tak terhindarkan. Dampak yang sangat nyata dari kedua situasi tersebut adalah pada lingkungan. Akhir-akhir ini, sering terjadi bencana banjir yang hampir merata di seluruh dunia, belum lagi tanah longsor atau bencana alam lainnya. Secara tidak langsung, bencana ini merupakan akibat dari perubahan iklim yang menyebabkan pemanasan global terjadi di seluruh dunia. Akuntansi karbon menciptakan keunggulan kompetitif bagi perusahaan. Pembuat kebijakan di perusahaan dan lembaga saat ini mengandalkan akuntansi karbon untuk mengambil keputusan mengenai perubahan iklim dan pelestarian lingkungan (Okafor *et al.*, 2022). Adaptasi industri global terhadap dampak perubahan iklim pada daerah aliran sungai merupakan masalah yang semakin mendesak. Karena perubahan iklim mengubah ketersediaan, kualitas, dan distribusi sumber daya air tawar, industri yang bergantung pada sumber daya ini terpaksa mengadopsi strategi adaptif. Adaptasi berfokus pada pengurangan kerentanan, mengelola risiko, dan meningkatkan ketahanan terhadap perubahan pola hidrologi di daerah aliran sungai.

a. Efisiensi dan Konservasi Air

- 1) Pengelolaan Air Berkelanjutan: Banyak industri mengadopsi teknologi dan praktik hemat air untuk mengurangi dampak tekanan air yang disebabkan oleh iklim. Ini termasuk:
- 2) Sistem Air Tertutup: Sistem ini mensirkulasikan kembali air di dalam fasilitas, mengurangi kebutuhan air tawar dari daerah aliran sungai setempat. Industri seperti pertambangan, tekstil, dan pengolahan makanan semakin mengadopsi sistem loop tertutup untuk meminimalkan konsumsi air.
- 3) Daur Ulang dan Penggunaan Kembali Air: Perusahaan berinvestasi dalam teknologi yang memungkinkan air limbah diolah dan digunakan kembali dalam operasi mereka. Ini sangat penting untuk industri seperti produksi kertas dan manufaktur minuman, yang sangat intensif air.
- 4) Mengurangi Kehilangan Air: Melalui infrastruktur yang lebih baik, deteksi kebocoran, dan pengukuran, industri mengurangi kehilangan air dalam distribusi dan penggunaan. Ini sangat penting bagi kotamadya dan industri yang mengelola air untuk konsumsi publik atau industri

b. Sumber Air Alternatif

- 1) Desalinasi: Di daerah di mana sumber daya air tawar terbatas, industri beralih ke teknologi desalinasi untuk menghasilkan air minum dari air laut. Meskipun intensif energi dan mahal, desalinasi menjadi lebih layak karena sumber energi terbarukan menjadi lebih mudah diakses.
- 2) Pemanenan Air Hujan: Bisnis, terutama di daerah yang kekurangan air, semakin banyak menggunakan pemanenan air hujan untuk melengkapi kebutuhan air mereka. Mengumpulkan dan menyimpan air hujan dapat menyediakan sumber air yang lebih berkelanjutan, terutama selama periode kemarau ketika sumber konvensional mengalami tekanan.

- 3) Penangkapan Air Hujan: Industri mengadopsi sistem yang menangkap dan menyimpan air hujan, mengurangi tekanan pada DAS lokal selama peristiwa curah hujan lebat dan memastikan pasokan cadangan air selama musim kemarau.
- c. Memulihkan Kesehatan Daerah Aliran Sungai
- 1) Reboisasi dan Penghijauan: Industri di bidang pertanian, kehutanan, dan konstruksi mendukung inisiatif penanaman pohon skala besar untuk memulihkan kesehatan daerah aliran sungai. Reboisasi membantu menstabilkan tanah, mengurangi erosi, dan meningkatkan retensi air di DAS, yang, pada gilirannya, mendukung ketersediaan air jangka panjang.
 - 2) Restorasi Lahan Basah: Lahan basah memainkan peran penting dalam menyaring air, mengendalikan banjir, dan menjaga keanekaragaman hayati. Sektor industri yang bergantung pada sumber air bersih, seperti pengolahan makanan dan produksi minuman, berinvestasi dalam restorasi lahan basah untuk meningkatkan kualitas air dan ketahanan terhadap cuaca ekstrem.
 - 3) Zona Penyangga Riparian: Industri yang bergerak di bidang pertanian, kehutanan, dan pengembangan lahan menciptakan atau memulihkan penyangga riparian (area vegetasi di sepanjang aliran air) untuk mengurangi limpasan, mencegah erosi tanah, dan melindungi kualitas air di daerah aliran sungai.
- d. Mengadopsi Pertanian Tangguh Iklim
- 1) Tanaman Tahan Kekeringan: Sektor pertanian menanggapi risiko berkurangnya ketersediaan air dengan beralih ke varietas tanaman yang tahan kekeringan. Tanaman ini membutuhkan lebih sedikit air, membuatnya lebih tahan terhadap perubahan iklim dan mengurangi tekanan pada daerah aliran sungai setempat.

- 2) Pertanian Presisi: Menggunakan teknologi seperti sensor, data satelit, dan AI, industri mengadopsi metode pertanian presisi untuk mengoptimalkan penggunaan air. Sistem ini membantu petani menerapkan air hanya di mana dan saat dibutuhkan, meminimalkan limbah dan menghemat air dari daerah aliran sungai setempat.
 - 3) Pengelolaan Sumber Daya Air Terpadu (IWRM): Pendekatan ini menggabungkan pengelolaan DAS dengan praktik pertanian berkelanjutan, memastikan bahwa air digunakan secara efisien untuk irigasi dan limpasan pertanian dikelola untuk mencegah pencemaran sumber air lokal.
- e. Menggabungkan Solusi Berbasis Alam
- 1) Infrastruktur Alam: Banyak industri semakin berinvestasi dalam solusi berbasis alam (NbS) untuk melindungi dan memulihkan daerah aliran sungai. Solusi ini meliputi:
 - 2) Restorasi Dataran Banjir: Memulihkan dataran banjir alami dapat membantu mengurangi risiko banjir dengan menyediakan ruang untuk kelebihan air untuk disimpan selama hujan lebat. Ini dapat mencegah banjir hilir dan mengurangi ketegangan pada pertahanan banjir buatan.
 - 3) Penyangga Riparian dan Infrastruktur Hijau: Atap hijau, trotoar permeabel, dan hutan kota menjadi lebih umum di daerah perkotaan untuk mengelola air hujan dan mengurangi tekanan pada daerah aliran sungai.
 - 4) Pembayaran Jasa Ekosistem: Beberapa industri terlibat dalam skema pembayaran untuk layanan ekosistem (PES), di mana mereka secara finansial mendukung upaya konservasi DAS (misalnya, melindungi hutan, lahan basah, atau padang rumput) sebagai imbalan untuk memastikan kualitas dan kuantitas air yang andal di masa depan.

- 5) Zonasi Dataran Banjir dan Retret Terkelola: Pembangunan infrastruktur di daerah rawan banjir sedang dipertimbangkan kembali. Zonasi dataran banjir membantu mengurangi pembangunan infrastruktur baru di daerah berisiko tinggi, sementara retret terkelola melibatkan relokasi komunitas yang rentan dan infrastruktur penting jauh dari daerah rawan banjir.
 - 6) Pengelolaan Banjir Alami: Restorasi lahan basah, reboisasi, dan zona penyangga riparian digunakan untuk menyerap kelebihan air, mengurangi risiko banjir, dan melindungi ekosistem. Ruang hijau perkotaan dan permukaan permeabel juga berperan dalam mengurangi limpasan air hujan dan mengurangi risiko banjir di kota.
 - 7) Penyimpanan dan Distribusi Air: Untuk memastikan pasokan air yang andal dalam menghadapi pola curah hujan yang berubah, kota-kota dan industri berinvestasi di waduk, sistem pemanenan air hujan, dan pabrik desalinasi. Selain itu, meningkatkan efisiensi sistem distribusi air (misalnya, mengurangi kebocoran dan kerugian) sangat penting untuk memastikan pemulihan.
- f. Infrastruktur Tahan Iklim
- 1) Penyimpanan Air dan Waduk : Untuk mengatasi banjir dan kekeringan, industri berinvestasi dalam infrastruktur penyimpanan air, seperti waduk dan bendungan, untuk mengelola variasi musiman dalam pasokan air dengan lebih baik. Dalam beberapa kasus, pemangku kepentingan industri bekerja dengan pemerintah dan masyarakat untuk memastikan distribusi yang adil dan pengelolaan sumber daya ini secara berkelanjutan.
 - 2) Manajemen Banjir: Industri membangun atau meningkatkan pertahanan banjir, termasuk tanggul dan penghalang banjir, di daerah rentan. Selain itu, mereka memasukkan risiko banjir ke dalam proses

pengambilan keputusan mereka saat merancang infrastruktur baru atau memilih lokasi untuk fasilitas.

- 3) Desalinisasi dan Instalasi Pengolahan Air: Perusahaan di daerah yang mengalami tekanan air juga berinvestasi dalam teknologi pengolahan air mutakhir (seperti reverse osmosis dan filtrasi UV) untuk memastikan bahwa air yang mereka gunakan dari daerah aliran sungai aman dan dapat digunakan kembali tanpa merusak lingkungan.
 - 4) Infrastruktur Hijau (GI): GI mencakup solusi berbasis alam seperti taman hujan, trotoar permeabel, lahan basah perkotaan, atap hijau, dan rawa vegetasi. Sistem ini menangkap, menyimpan, dan menyusup ke air hujan, mengurangi risiko banjir, meningkatkan kualitas air, dan mengisi kembali pasokan air tanah.
 - 5) Cekungan Penahanan dan Retensi: Ini adalah struktur besar, terbuka atau bawah tanah yang dirancang untuk menahan limpasan air hujan untuk sementara dan melepaskannya perlahan ke sungai atau danau, mencegah banjir dan mengurangi tekanan pada sistem drainase.
 - 6) Infrastruktur Biru-Hijau: Mengintegrasikan pengelolaan air dengan ruang hijau perkotaan, meningkatkan ketahanan ekologis dan mengurangi efek pulau panas perkotaan sekaligus meningkatkan pengelolaan risiko air hujan dan banjir.
- g. Pemantauan dan Pengambilan Keputusan Berbasis Data
- 1) Pemodelan dan Peramalan Hidrologi: Industri menggunakan analitik data canggih, pemantauan satelit, dan pemodelan hidrologi untuk memprediksi perubahan kondisi daerah aliran sungai. Data real-time tentang ketinggian air, suhu, dan kualitas memungkinkan industri untuk menyesuaikan operasi mereka secara proaktif dan menghindari gangguan akibat kelangkaan atau kontaminasi air.

- 2) **Penilaian Risiko Air:** Perusahaan melakukan penilaian risiko air yang komprehensif untuk memahami kerentanan mereka terhadap gangguan DAS, termasuk risiko dari kekeringan, banjir, polusi, dan perubahan kebijakan air. Penilaian ini menginformasikan perencanaan strategis dan investasi dalam langkah-langkah adaptif.
 - 3) **Sensor Kualitas Air:** Sensor ini digunakan di sungai, danau, dan sungai untuk memantau parameter seperti pH, kekeruhan, oksigen terlarut, konduktivitas, dan konsentrasi kontaminan (misalnya, nitrat, fosfat, logam berat). Data dapat ditransmisikan secara real-time ke sistem pemantauan pusat untuk analisis.
 - 4) **Stasiun Cuaca:** Stasiun cuaca berbasis darat, dilengkapi dengan sensor suhu, kelembaban, curah hujan, dan kecepatan angin, membantu memantau kondisi iklim yang memengaruhi hidrologi daerah aliran sungai.
 - 5) **Stream Gauges:** Flow gauge yang dipasang di titik-titik strategis di sepanjang sungai dan sungai mengukur debit dan tahap (ketinggian air) secara real time. Data ini sangat penting untuk prakiraan banjir, pemantauan kekeringan, dan pemodelan hidrologi.
- h. **Ketahanan Rantai Pasokan**
- 1) **Sumber Hemat Air:** Perusahaan semakin banyak mencari bahan dari daerah dengan daerah aliran sungai yang stabil dan tangguh atau bekerja sama dengan pemasok untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air dalam operasi mereka. Misalnya, produsen barang konsumen mulai memprioritaskan rantai pasokan hemat air sebagai bagian dari strategi tanggung jawab sosial perusahaan (CSR) dan keberlanjutan mereka.
 - 2) **Diversifikasi Sumber Pasokan:** Untuk mengurangi risiko yang terkait dengan kelangkaan air di wilayah

tertentu, industri mendiversifikasi rantai pasokan mereka dan memindahkan operasi ke daerah dengan sumber daya air yang lebih andal. Ini mungkin termasuk pergeseran produksi dari daerah rawan kekeringan ke daerah dengan ketersediaan air yang melimpah.

i. Advokasi dan Regulasi Kebijakan

- ✓ Tata Kelola Air dan Keterlibatan Kebijakan: Industri semakin terlibat dalam advokasi kebijakan untuk membentuk peraturan dan kebijakan terkait air, memastikan bahwa aturan ini mendukung pengelolaan DAS yang berkelanjutan. Ini mungkin termasuk mengadvokasi distribusi air yang lebih adil, kontrol polusi yang lebih ketat, atau investasi yang lebih besar dalam restorasi DAS.
- ✓ Kepatuhan terhadap Undang-Undang Air: Ketika pemerintah memperkenalkan undang-undang konservasi air yang lebih ketat dalam menanggapi perubahan iklim, industri beradaptasi dengan memastikan kepatuhan terhadap peraturan ini, termasuk langkah-langkah untuk mengurangi polusi air dan meningkatkan upaya daur ulang air.

6.7 Kesimpulan

Beradaptasi dengan dampak perubahan iklim pada DAS membutuhkan pendekatan multifaset, menggabungkan inovasi teknologi, solusi berbasis alam, tata kelola air yang lebih baik, dan praktik bisnis yang berkelanjutan. Dengan mengadopsi strategi seperti efisiensi air, restorasi ekosistem, infrastruktur tahan iklim, dan tata kelola kolaboratif, industri dapat mengurangi kerentanan mereka terhadap gangguan terkait air dan berkontribusi pada kesehatan jangka panjang DAS yang mereka andalkan. Seiring percepatan perubahan iklim, ketahanan industri akan semakin bergantung pada kemampuan mereka untuk mengintegrasikan pengelolaan air yang berkelanjutan dan beradaptasi dengan perubahan pola hidrologi.

DAFTAR PUSTAKA

- Afuye, G.A., Kalumba, A.M. and Orimoloye, I.R. (2021) 'Characterisation of vegetation response to climate change: A review', *Sustainability (Switzerland)*, 13(13). Available at: <https://doi.org/10.3390/su13137265>.
- Andi Adwan. T, Nurlaela Latief, R.I. (2021) 'Pengaruh Pengetahuan K3 (Keselamatan Dan Kesehatan Kerja) Terhadap Kesadaran Berperilaku K3 Di Laboratorium Jurusan Pendidikan Teknik Mesin Universitas Negeri Makassar', *Jurusan Pendidikan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Makassar*, 3(July), pp. 1–19.
- Awazi, N.P. (2022) 'Agroforestry for Climate Change Adaptation, Resilience Enhancement and Vulnerability Attenuation in Smallholder Farming Systems in Cameroon', *Journal of Atmospheric Science Research*, 5(1), pp. 25–33. Available at: <https://doi.org/10.30564/jasr.v5i1.4303>.
- Chen, D. *et al.* (2024) 'Biogenic elements-informed assessment of the impact of human activities on river ecosystems', *Journal of Environmental Management*, 353. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120276>.
- Cintra, A.K.A., Setyobudiandi, I. and Fahrudin, A. (2017) 'ANALISIS KERENTANAN PERIKANAN TANGKAP AKIBAT PERUBAHAN IKLIM PADA SKALA PROVINSI (Province Scaled Fisheries Vulnerability on Climate Change)', *Marine Fisheries: Journal of Marine Fisheries Technology and Management*, 8(2), pp. 223–233. Available at: <https://doi.org/10.29244/jmf.8.2.223-233>.
- DiBiase, R.A. and Whipple, K.X. (2011) 'The influence of erosion thresholds and runoff variability on the relationships among topography, climate, and erosion rate', *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(4). Available at: <https://doi.org/10.1029/2011JF002095>.
- Eekhout, J.P.C. and de Vente, J. (2022) 'Global impact of climate change on soil erosion and potential for adaptation through soil conservation', *Earth-Science Reviews*. Elsevier B.V. Available at:

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103921>.

- Haryanto, Y.D. *et al.* (2021) 'Pengaruh El Niño Terhadap Pola Distribusi Klorofil-a dan Pola Arus di Wilayah Perairan Selatan Maluku', *Jurnal Kelautan Tropis*, 24(3), pp. 364–374. Available at: <https://doi.org/10.14710/jkt.v24i3.10456>.
- ISAP2023 (2023) *Accelerating Sustainability Transitions in Asia and the Pacific: The Transformative Potential of Integration, Inclusion and Localisation International Forum for Sustainable Asia and the Pacific*. Available at: <https://www.iges.or.jp/en/pub/isap2023-e/en> (Accessed: 15 September 2024).
- Islam, M.M. *et al.* (2022) 'A bibliometric analysis on the research trends of climate change effects on economic vulnerability', *Environmental Science and Pollution Research*, 29(39), pp. 59300–59315. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20028-0>.
- Li, Congcong *et al.* (2021) 'An integrated simulation-optimization modeling system for water resources management under coupled impacts of climate and land use variabilities with priority in ecological protection', *Advances in Water Resources*, 154. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.103986>.
- Li, Y. *et al.* (2019) 'Responses of the Yellow River basin vegetation: climate change', *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 11(4), pp. 483–498. Available at: <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-08-2018-0064>.
- Li, Z. and Fang, H. (2016) 'Impacts of climate change on water erosion: A review', *Earth-Science Reviews*. Elsevier B.V., pp. 94–117. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.10.004>.
- Malhi, Y. *et al.* (2020) 'Climate change and ecosystems: Threats, opportunities and solutions', *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. Royal Society Publishing. Available at: <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0104>.
- Marder, E. and Gallen, S.F. (2023) 'Climate control on the relationship between erosion rate and fluvial topography',

- Geology*, 51(5), pp. 424–427. Available at: <https://doi.org/10.1130/G50832.1>.
- Miller, S. *et al.* (2021) 'Heat waves, climate change, and economic output', *Journal of the European Economic Association*. Oxford University Press, pp. 2658–2694. Available at: <https://doi.org/10.1093/jeea/jvab009>.
- van Noordwijk, M. *et al.* (2021) 'Climate change adaptation in and through agroforestry: four decades of research initiated by Peter Huxley', *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. Springer Science and Business Media B.V. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11027-021-09954-5>.
- Nufutomo, T.K. (2022) 'PERUBAHAN IKLIM SEBAGAI ANCAMAN KETAHANAN KUALITAS AIR PADA DAERAH ALIRAN SUNGAI: LITERATUR REVIEW', *Jurnal Reka Lingkungan*, 10(3), pp. 188–200. Available at: <https://doi.org/10.26760/rekalingkungan.v10i3.188-200>.
- Okafor, O. *et al.* (2022) 'IMPACT OF CARBON ACCOUNTING AS A REFLECTION TO CLIMATE CHANGE IN MANUFACTURING INDUSTRIES', *STUDIES IN ECONOMICS AND INTERNATIONAL FINANCE*, 2(1), pp. 25–36. Available at: <https://doi.org/10.47509/seif.2022.v02i01.02>.
- Oliveira, B.F., Moore, F.C. and Dong, X. (2022) 'Biodiversity mediates ecosystem sensitivity to climate variability', *Communications Biology*, 5(1). Available at: <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03573-9>.
- Ortiz, A.M.D. *et al.* (2021) 'A review of the interactions between biodiversity, agriculture, climate change, and international trade: research and policy priorities', *One Earth*. Cell Press, pp. 88–101. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.12.008>.
- Ougahi, J.H., Cutler, M.E.J. and Cook, S.J. (2022) 'Assessment of climate change effects on vegetation and river hydrology in a semi-arid river basin', *PLoS ONE*, 17(8 August). Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0271991>.
- Patle, G.T., Kumar, M. and Khanna, M. (2020) 'Climate-smart water technologies for sustainable agriculture: A review', *Journal of Water and Climate Change*, 11(4), pp. 1455–1466. Available

- at: <https://doi.org/10.2166/wcc.2019.257>.
- Peel, M.C., McMahon, T.A. and Finlayson, B.L. (2010) 'Vegetation impact on mean annual evapotranspiration at a global catchment scale', *Water Resources Research*, 46(9). Available at: <https://doi.org/10.1029/2009WR008233>.
- Popi, R. (2014) 'Dampak Perubahan Iklim terhadap Sumberdaya Air: Identifikasi, Simulasi, dan Rencana Aksi', *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 8(1), pp. 1–15. Available at: <http://go.worldbank.org/0F7PS203T0>.
- Rhodes, C.J. (2014) 'Soil erosion, climate change and global food security: Challenges and strategies', *Science Progress*, 97(2), pp. 97–153. Available at: <https://doi.org/10.3184/003685014X13994567941465>.
- Sarvina, Y. (2019) 'DAMPAK PERUBAHAN IKLIM DAN STRATEGI ADAPTASI TANAMAN BUAH DAN SAYURAN DI DAERAH TROPIS / Climate Change Impact and Adaptation Strategy for Vegetable and Fruit Crops in the Tropic Region', *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pertanian*, 38(2), p. 65. Available at: <https://doi.org/10.21082/jp3.v38n2.2019.p65-76>.
- Shen, D. (2021) 'Water Quality Management', in *Global Issues in Water Policy*. Springer Science and Business Media B.V., pp. 199–220. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-61931-2_9.
- Shrestha, S. *et al.* (2020) 'Evaluation of adaptation options for reducing soil erosion due to climate change in the Swat River Basin of Pakistan', *Ecological Engineering*, 158. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106017>.
- Whitehead, P.G. *et al.* (2019) 'Water quality modelling of the Mekong River basin: Climate change and socioeconomics drive flow and nutrient flux changes to the Mekong Delta', *Science of the Total Environment*, 673, pp. 218–229. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.315>.
- Yanti, E., Aprihatin, Y. and Armaita (2024) 'Analysis of River Environmental Pollution Factors', *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 10(2), pp. 465–470. Available at: <https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i2.6821>.

- Zhang, L. *et al.* (2018) 'Understanding the impacts of climate and landuse change on water yield', *Current Opinion in Environmental Sustainability*. Elsevier B.V., pp. 167–174. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.04.017>.
- Zhang, X. and Huang, X. (2019) 'Human disturbance caused stronger influences on global vegetation change than climate change', *PeerJ*, 2019(9). Available at: <https://doi.org/10.7717/peerj.7763>.

BAB 7

ARAH MASA DEPAN DALAM TEKNIK SUNGAI

Oleh Imam Rohani

7.1 Pendahuluan

Sungai merupakan salah satu komponen penting dalam ekosistem yang memiliki peran vital bagi kehidupan manusia. Namun, berbagai aktivitas manusia seperti pembangunan infrastruktur, pengelolaan sumber daya air, dan perubahan tata guna lahan dapat memberikan dampak signifikan terhadap kondisi sungai (Sobirov, 2024). Oleh karena itu, diperlukan pemahaman yang komprehensif mengenai arah perkembangan teknik sungai di masa depan untuk menjamin keberlanjutan fungsi sungai.

Salah satu tantangan utama dalam teknik sungai di masa depan adalah mengatasi dampak perubahan iklim terhadap hidrologi sungai. Penelitian menunjukkan bahwa perubahan iklim dapat menyebabkan peningkatan frekuensi dan intensitas banjir serta kekeringan di berbagai wilayah (Lane and Kay, 2021). Hal ini dapat mengubah pola aliran sungai dan meningkatkan risiko bencana alam (Death, Fuller and Macklin, 2015). Selain itu, aktivitas manusia seperti pembangunan bendungan, normalisasi sungai, dan drainase lahan dapat memperburuk kondisi sungai (Wang and Xu, 2018).

Tantangan lain yang dihadapi adalah mengelola sedimentasi sungai. Sedimentasi dapat disebabkan oleh berbagai faktor, seperti erosi akibat letusan gunung berapi, pembangunan infrastruktur, dan perubahan tata guna lahan (Pierson and Major, 2014). Akumulasi sedimen dapat mengganggu aliran sungai, merusak habitat, dan menimbulkan banjir (Sobirov, 2024). Oleh karena itu, diperlukan strategi pengelolaan sedimen yang komprehensif untuk menjaga keberlanjutan sungai (Rosen and Xu, 2014).

Tantangan di masa depan juga harus mempertimbangkan aspek ekologi dan keberlanjutan. Penelitian menunjukkan bahwa interaksi antara sungai, vegetasi, dan organisme lain memainkan peran penting dalam pembentukan morfologi sungai dan mendukung keanekaragaman hayati (Polvi and Sarneel, 2017). Namun, aktivitas manusia seringkali mengabaikan aspek ini dan menyebabkan degradasi ekosistem sungai (Death, Fuller and Macklin, 2015). Oleh karena itu, pendekatan teknik sungai yang terintegrasi dengan aspek ekologi dan keberlanjutan menjadi sangat penting (Gurnell *et al.*, 2011).

7.2 Evolusi Teknik Sungai

Evolusi teknik sungai adalah proses yang kompleks dan melibatkan interaksi antara faktor-faktor alam dan manusia. Teknik sungai telah berkembang dari pendekatan yang lebih tradisional ke metode yang lebih canggih dan berkelanjutan, yang mencerminkan pemahaman yang lebih baik tentang dinamika sungai dan ekosistem yang terkait.

7.2.1 Masa Lalu

Dalam masa lalu, pengelolaan sungai di banyak negara umumnya mengandalkan pendekatan tradisional yang berfokus pada rekayasa teknis untuk mengendalikan aliran sungai dan mencegah banjir (Spink, Fryirs and Brierley, 2008). Misalnya, pada tahun 1956 di Australia, para insinyur ditugaskan untuk merancang dan membangun struktur rekayasa sungai untuk mempersempit aliran (memutus hubungan saluran dengan dataran banjir), menstabilkan makrosaluran, mencegah erosi tebing lebih lanjut, dan menyelaraskan aliran menjauhi tebing yang tererosi. Banyak desain yang digunakan untuk menerapkan program pelatihan sungai dan mitigasi banjir pada saat itu diadopsi dari desain yang dikembangkan di luar negeri (Spink, Fryirs and Brierley, 2008). Pendekatan tradisional ini sering kali mengabaikan aspek ekologis dan geomorfologis sungai, sehingga dapat menimbulkan dampak negatif pada lingkungan (Chin and Gregory, 2005). Misalnya, struktur pengerasan tebing dapat mengganggu proses alami pembentukan titik bar dan erosi tebing yang penting bagi ekosistem

sungai (Amisshah, Kiss and Fiala, 2019). Selain itu, rekayasa sungai juga dapat mengubah pola aliran dan sedimentasi, yang dapat berdampak pada siklus karbon dan fungsi ekosistem sungai (Shen *et al.*, 2021).

7.2.2 Masa Kini

Dalam beberapa dekade terakhir, terjadi pergeseran paradigma dalam pengelolaan sungai, dari pendekatan tradisional yang berfokus pada rekayasa teknis menjadi pendekatan yang lebih holistik dan mempertimbangkan aspek ekologis dan geomorfologis (Chin and Gregory, 2005). Pendekatan ini dikenal sebagai "*geomorphic river management*" atau pengelolaan sungai berbasis geomorfologi.

Pendekatan ini menekankan pentingnya memahami proses-proses alami yang terjadi di dalam sistem sungai, seperti dinamika aliran, sedimentasi, dan interaksi antara saluran sungai dengan dataran banjir (Chin and Gregory, 2005). Dengan pemahaman yang lebih baik tentang proses-proses ini, para pengelola sungai dapat merancang intervensi yang lebih efektif dan berkelanjutan, seperti penggunaan teknik rekayasa hayati (bioengineering) untuk menstabilkan tebing sungai (Cavaille *et al.*, 2015).

Pendekatan holistik juga mendorong penggunaan teknologi canggih dalam pemantauan dan pemodelan sungai, seperti penggunaan citra satelit, sensor, dan model matematika untuk memprediksi perubahan sungai akibat faktor-faktor seperti perubahan iklim (Deng *et al.*, 2021).

7.2.3 Masa Depan

Ke depan, pengelolaan sungai akan menghadapi tantangan baru, terutama terkait dengan perubahan iklim. Perubahan iklim dapat menyebabkan pergeseran pola curah hujan dan aliran sungai, serta meningkatkan risiko banjir dan kekeringan (Rheinheimer and Viers, 2014). Hal ini akan menuntut pendekatan pengelolaan sungai yang lebih adaptif dan fleksibel.

Strategi yang dapat ditempuh adalah dengan memanfaatkan infrastruktur hijau, seperti pengembangan lahan basah buatan (constructed wetlands) dan tempat tumbuh terapung (floating

beds) untuk meremediasi sungai yang tercemar (Anawar and Chowdhury, 2020). Strategi lain adalah dengan mengoptimalkan pengoperasian waduk untuk mengelola sedimen dan aliran sungai secara berkelanjutan (Kondolf *et al.*, 2014).

Pengelolaan sungai di masa depan juga harus mempertimbangkan perubahan penggunaan lahan dan kebutuhan air, serta beradaptasi dengan kondisi baru yang mungkin terjadi (James, 2015). Pendekatan yang fleksibel dan berorientasi pada proses alami sungai akan menjadi kunci keberhasilan pengelolaan sungai di masa depan.

7.3 Pendekatan Holistik

Pendekatan holistik dalam teknik sungai merupakan suatu pendekatan yang mengintegrasikan berbagai aspek dalam pengelolaan dan restorasi sungai. Pendekatan ini bertujuan untuk mencapai keberlanjutan ekosistem sungai dengan mempertimbangkan interaksi kompleks antara faktor-faktor biotik dan abiotik, serta dampak dari aktivitas manusia.

7.3.1 Pendekatan Sosio-Ekologis

Pendekatan sosio-ekologis dalam teknik sungai menekankan pada pemahaman yang holistik terhadap sungai sebagai suatu sistem yang kompleks, yang dipengaruhi oleh faktor-faktor ekologis, sosial, dan ekonomi. Pendekatan ini bertujuan untuk mencapai keberlanjutan dan ketahanan sungai dalam jangka panjang (Ekka *et al.*, 2020).

Aspek penting dalam pendekatan sosio-ekologis adalah pemanfaatan sedimen yang berasal dari pengerukan sungai sebagai sumber daya yang berharga untuk restorasi ekosistem pesisir. Sedimen ini dapat digunakan untuk membangun kembali habitat rawa-rawa pantai yang telah terdegradasi (Suedel *et al.*, 2021). Pendekatan sosio-ekologis juga menekankan pentingnya mempertimbangkan proses-proses biofisik yang mendasari fungsi ekosistem sungai, serta keterkaitan antara nilai-nilai ekologis, ekonomi, dan sosial-budaya (Ekka *et al.*, 2020).

Dalam implementasinya, pendekatan sosio-ekologis memerlukan kolaborasi yang erat antara berbagai pemangku

kepentingan, termasuk masyarakat lokal, untuk memastikan bahwa tujuan-tujuan restorasi dan pengelolaan sungai dapat tercapai secara efektif (Angelopoulos, Cowx and Buijse, 2017). Pendekatan ini juga membutuhkan penggunaan teknologi dan inovasi, seperti kecerdasan buatan dan pemodelan, untuk mendukung pengambilan keputusan yang berkelanjutan (Wankhede *et al.*, 2023).

Beberapa prinsip kunci dalam pendekatan sosio-ekologis untuk restorasi sungai mencakup (Beechie *et al.*, 2010):

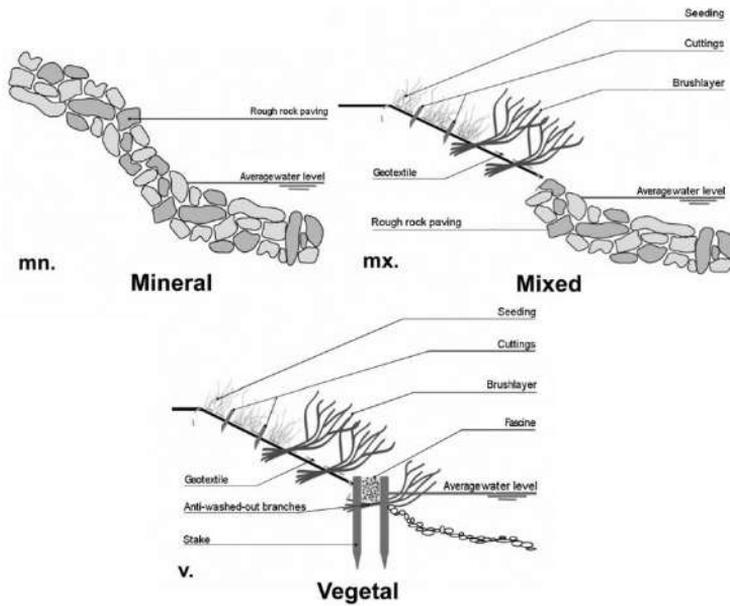
1. Mengatasi penyebab utama degradasi sungai
2. Memastikan tindakan restorasi sesuai dengan potensi fisik dan biologis lokasi
3. Melakukan tindakan pada skala yang sesuai
4. Mempertimbangkan proses-proses hirarki pada skala regional, DAS, dan lokal

Selain itu, pendekatan sosio-ekologis juga menekankan pentingnya pemantauan dan evaluasi yang komprehensif, termasuk dampak jangka panjang dari tindakan restorasi, untuk memastikan keberlanjutan dan efektivitas upaya-upaya tersebut (Konrad, Warner and Higgins, 2011).

7.3.2 Pendekatan Biorekayasa untuk Stabilisasi Tebing

Pendekatan biorekayasa telah menjadi salah satu fokus utama dalam teknik sungai untuk stabilisasi tebing sungai. Beberapa referensi menunjukkan bahwa pendekatan ini memiliki potensi yang besar untuk mengatasi permasalahan erosi dan stabilitas tebing sungai secara efektif dan berkelanjutan (Shah and Dahal, 2023).

Keunggulan utama pendekatan biorekayasa adalah kemampuannya untuk memadukan aspek teknis dan ekologis dalam penanganan masalah sungai (Raut and Gudmestad, 2018). Teknik-teknik biorekayasa seperti penanaman vegetasi, penggunaan struktur hidup, dan integrasi dengan komponen alami lainnya terbukti dapat meningkatkan stabilitas tebing sungai sekaligus memperbaiki kualitas habitat dan ekosistem sungai (Anawar and Chowdhury, 2020).



Gambar 7.1. Biorekayasa untuk Stabilisasi Tebing
Sumber : Cavallé et al., 2015

Beberapa studi menunjukkan bahwa teknik biorekayasa dapat mengurangi biaya konstruksi dan pemeliharaan dibandingkan dengan pendekatan teknik sipil konvensional (Shah and Dahal, 2023). Selain itu, teknik biorekayasa juga dianggap lebih ramah lingkungan dan dapat mendukung proses suksesi alami vegetasi di sepanjang sungai (Janssen *et al.*, 2019).

Beberapa referensi juga menekankan pentingnya integrasi antara teknik biorekayasa dengan pendekatan teknik sipil konvensional untuk mencapai hasil yang optimal (Anawar and Chowdhury, 2020). Kombinasi berbagai teknik, baik yang berbasis alam maupun buatan, dapat memberikan solusi yang lebih komprehensif dan efektif dalam mengatasi permasalahan stabilitas tebing sungai (Anawar and Chowdhury, 2020).

7.3.3 Restorasi Sungai

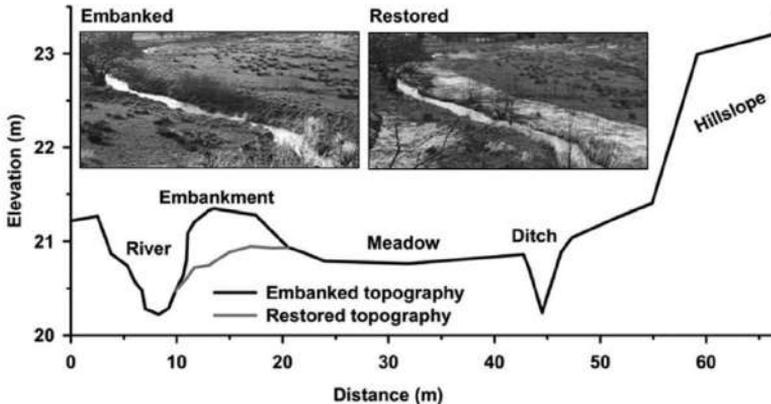
Restorasi sungai merupakan upaya untuk memulihkan kondisi sungai agar dapat berfungsi secara optimal dan berkelanjutan. Berikut adalah beberapa poin penting terkait restorasi sungai :

1. Tujuan utama restorasi sungai adalah untuk meningkatkan kondisi ekologis sungai, seperti meningkatkan keanekaragaman hayati, memperbaiki kualitas air, dan memulihkan fungsi-fungsi ekosistem sungai (Tickner *et al*, 2020).
2. Prinsip-prinsip utama dalam restorasi sungai adalah (Beechie *et al*, 2010):
 - a. Mengatasi penyebab utama degradasi sungai
 - b. Mempertimbangkan potensi fisik dan biologis lokasi
 - c. Melakukan tindakan pada skala yang sesuai
 - d. Memperhatikan proses-proses hirarki pada tingkat regional, DAS, dan lokal
3. Tahapan Restorasi Sungai
Restorasi sungai umumnya dilakukan melalui tahapan-tahapan berikut:
 - a. Persiapan sosial masyarakat (Zunariyah, Suharko and Suharman, 2022):
 - 1) Membangun kesadaran bersama dan menyamakan cara pandang antar warga bantaran sungai.
 - 2) Melakukan konsolidasi antar warga bantaran sungai yang terhubung secara spasial antar wilayah sungai.
 - 3) Menggalang dukungan, lobby, dan advokasi dari para pengambil kebijakan dari unsur eksekutif dan legislatif.
 - b. Penilaian dan perencanaan restorasi (Becker *et al*, 2022):
 - 1) Melakukan penilaian kondisi sungai, termasuk aspek fisik, ekologi, dan hidrologis.
 - 2) Mengidentifikasi penyebab degradasi habitat dan kerugian habitat yang paling berpengaruh terhadap biota dan ekosistem.

- 3) Mengevaluasi kelayakan berbagai opsi restorasi berdasarkan kendala penggunaan lahan dan ekonomi.
- 4) Memprioritaskan tindakan restorasi berdasarkan hasil penilaian dan skema prioritas yang dipilih.

c. Pelaksanaan restorasi (Clilverd *et al.*, 2016):

- 1) Melakukan restorasi dengan memperhatikan proses fisik dan ekologi, konektivitas dalam jaringan sungai, interaksi fisik-biotik, sejarah, dan kompleksitas tempat.
- 2) Mengintegrasikan berbagai disiplin ilmu untuk pendekatan yang komprehensif, seperti hidrologi, hidraulika, geomorfologi, ekologi, dan lainnya.
- 3) Memastikan tidak ada kerusakan permanen pada ekosistem selama tahap konstruksi (Palmer *et al.*, 2005).



Gambar 7.2. Contoh pelaksanaan restorasi tanggul
 Sumber : Clilverd *et al.*, 2016

d. Pemantauan dan evaluasi (England *et al.*, 2021):

- 1) Melakukan pemantauan sebelum dan setelah restorasi untuk menilai efektivitas.
- 2) Memantau perubahan habitat, komunitas biota, dan proses-proses ekologi.

- 3) Memperhatikan potensi ancaman dari spesies invasif yang dapat mengganggu keberhasilan restorasi.
- 4) Mempublikasikan data hasil penilaian dan pemantauan untuk pembelajaran dan perbaikan di masa depan.

Keberhasilan restorasi sungai dapat dinilai melalui indikator-indikator seperti kualitas air, struktur habitat, keanekaragaman hayati, dan fungsi ekosistem (Ali Al-Zankana, Matheson and Harper, 2020).

Beberapa contoh tindakan restorasi sungai yang dapat dilakukan antara lain (Serra-Llobet *et al.*, 2022):

1. Memulihkan konektivitas sungai dan dataran banjir
2. Memperbaiki kualitas air
3. Melindungi dan memulihkan habitat kritis
4. Mengelola pemanfaatan sumber daya ekosistem sungai
5. Mencegah dan mengendalikan invasi spesies asing

Keberhasilan restorasi sungai juga bergantung pada faktor-faktor lain seperti kualitas perencanaan, keterlibatan pemangku kepentingan, dan pemantauan yang memadai (Wohl, Lane and Wilcox, 2015).

7.4 Kolaborasi Lintas Disiplin

Kolaborasi lintas disiplin dalam teknik sungai merupakan pendekatan yang melibatkan integrasi pengetahuan dan metodologi dari berbagai disiplin ilmu, termasuk teknik, ekologi, dan ilmu sosial, untuk menciptakan solusi yang lebih efektif dan berkelanjutan.

7.4.1 Manajemen Banjir Terpadu

Manajemen banjir terpadu merupakan pendekatan yang mengintegrasikan antara berbagai metode pengelolaan, baik yang bersifat struktural maupun non-struktural, untuk mencapai keberlanjutan dalam pengelolaan risiko banjir.

1. Perencanaan Tata Ruang

Perencanaan tata ruang untuk mitigasi banjir merupakan aspek krusial dalam pengelolaan risiko banjir yang semakin meningkat akibat perubahan iklim dan urbanisasi. Dalam konteks ini, pendekatan yang terintegrasi antara perencanaan ruang dan manajemen risiko banjir menjadi sangat penting. Penelitian menunjukkan bahwa perencanaan tata ruang yang efektif dapat meningkatkan ketahanan kota terhadap banjir dengan mempertimbangkan berbagai faktor, termasuk risiko banjir yang dihadapi, karakteristik lingkungan, dan kondisi sosial-ekonomi masyarakat yang terdampak (Afriyanie, Julian and Nugraha, 2022).

Penggunaan penilaian lingkungan strategis (*Strategic Environmental Assessment, SEA*) dalam perencanaan manajemen banjir menjadi tools yang sering digunakan. SEA berfungsi sebagai alat untuk memastikan bahwa aspek lingkungan dipertimbangkan dalam pengambilan keputusan terkait perencanaan ruang dan pengelolaan risiko banjir. Misalnya, penelitian di Thailand menunjukkan bahwa integrasi SEA dalam rencana manajemen banjir dapat membantu dalam merumuskan kebijakan yang lebih berkelanjutan dan responsif terhadap perubahan iklim (Prathaithep *et al.*, 2022). Dengan demikian, SEA tidak hanya berfungsi sebagai alat evaluasi, tetapi juga sebagai panduan dalam merancang kebijakan yang lebih adaptif terhadap risiko banjir.

2. Sistem Peringatan Dini

Sistem peringatan dini banjir berbasis *Internet of Things* (IoT) telah menjadi salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan. Teknologi IoT memungkinkan pengumpulan data secara real-time mengenai ketinggian air dan kondisi cuaca, yang kemudian dapat diproses untuk memberikan peringatan kepada masyarakat. Misalnya, sistem yang dirancang oleh Ghasypham menggunakan sensor untuk mendeteksi ketinggian dan debit air di pertemuan tiga aliran sungai, memberikan informasi yang cepat dan akurat kepada masyarakat (Ghasypham, 2023). Selain itu, sistem yang

dikembangkan oleh Tenda et al. juga menunjukkan bagaimana informasi dapat disebar dengan cepat melalui platform media sosial seperti Twitter, sehingga masyarakat dapat mengambil tindakan antisipatif dengan segera (Tenda, Lengkong and Pinontoan, 2021).

Sistem peringatan dini tidak hanya berfungsi untuk memberikan informasi kepada masyarakat, tetapi juga untuk meningkatkan kesiapsiagaan dan respons terhadap bencana. Pelatihan dan edukasi masyarakat mengenai penggunaan sistem peringatan dini sangat penting untuk memastikan bahwa mereka dapat merespons dengan cepat ketika menerima peringatan. Suharini dan Kurniawan menekankan pentingnya pelatihan berbasis masyarakat untuk meningkatkan kapasitas masyarakat dalam menghadapi bencana banjir (Suharini and Kurniawan, 2019). Dengan demikian, pengembangan sistem peringatan dini harus diimbangi dengan upaya untuk meningkatkan pemahaman dan keterampilan masyarakat dalam menghadapi bencana.

7.4.2 Manajemen Sampah Sungai Inovatif

Manajemen sampah sungai merupakan inovasi dalam pengelolaan sampah, khususnya yang berkaitan dengan sungai, untuk mencegah pencemaran dan dampak negatif terhadap lingkungan. Berbagai pendekatan teknologi dan partisipasi masyarakat telah diusulkan untuk mengatasi masalah ini.

1. Teknologi Pengumpulan Sampah Otomatis

Dengan meningkatnya populasi dan aktivitas manusia di sekitar sungai, volume sampah yang masuk ke dalam ekosistem perairan juga meningkat, menyebabkan dampak negatif terhadap kualitas air dan kehidupan akuatik. Penelitian menunjukkan bahwa teknologi seperti sistem pengangkutan sampah otomatis dapat berperan penting dalam pengelolaan sampah di sungai, dengan mengurangi beban kerja manual dan meningkatkan efisiensi dalam pembersihan sungai (Rustandi *et al.*, 2021).



Gambar 7.3. Sistem pengangkutan sampah otomatis
Sumber : Rustandi et al., 2021

Sistem pengangkutan sampah otomatis yang terintegrasi dengan teknologi SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) memungkinkan pemantauan dan pengendalian secara *real-time* terhadap proses pengumpulan sampah. Dengan adanya sistem ini, data mengenai jenis dan volume sampah yang terkumpul dapat dikirimkan ke pusat kontrol, sehingga memudahkan pengelola dalam mengambil keputusan yang tepat terkait pengelolaan sampah. Selain itu, teknologi ini juga dapat dilengkapi dengan sistem pemisahan sampah, yang memungkinkan pemisahan antara limbah logam dan non-logam, sehingga meningkatkan efisiensi daur ulang (Rustandi *et al.*, 2021).

2. Inovasi dalam Daur Ulang Sampah Sungai

Daur ulang tidak hanya berkontribusi pada pengurangan limbah, tetapi juga menciptakan peluang ekonomi baru dan meningkatkan kesadaran masyarakat tentang pentingnya pengelolaan sampah. Berbagai metode dan teknologi telah dikembangkan untuk mengelola sampah yang dihasilkan dari aktivitas manusia, terutama di daerah yang berdekatan dengan sungai, di mana limbah sering kali berakhir di badan air.

Metode daur ulang biologis, seperti pengomposan dan pencernaan anaerobik, telah terbukti dapat mendegradasi bahan limbah organik secara efisien. Inovasi dalam daur ulang ini tidak hanya mengurangi jumlah limbah yang masuk ke sungai, tetapi juga menghasilkan produk yang bermanfaat seperti pupuk organik yang dapat digunakan untuk pertanian.

Selain itu, pengelolaan limbah organik juga berkontribusi pada penghematan energi dan pengurangan emisi gas rumah kaca, yang sangat penting dalam konteks perubahan iklim saat ini (Pahrijal, 2023).

Teknologi juga memainkan peran penting dalam inovasi daur ulang. Penggunaan ozon sebagai teknologi berkelanjutan dalam daur ulang air limbah domestik, dapat meningkatkan efisiensi proses pengolahan air limbah. Dengan menggunakan ozon, proses daur ulang menjadi lebih sederhana dan efektif dibandingkan dengan metode pengolahan kimia konvensional. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan ozon dapat mengurangi *Total Suspended Solids* (TSS) dan kontaminan lainnya secara signifikan, yang pada gilirannya dapat mengurangi pencemaran di sungai (Hamzah, 2022).

7.4.3 Manajemen Sedimen Berkelanjutan

Manajemen sedimen sungai berkelanjutan merupakan hal penting dalam pengelolaan sumber daya air dan lingkungan. Perubahan penggunaan lahan, kondisi iklim, dan teknik rekayasa sungai berkontribusi signifikan terhadap dinamika sedimen di sungai.

1. Pengerukan Selektif

Pengerukan sedimen tidak hanya berfungsi untuk meningkatkan kapasitas aliran sungai, tetapi juga untuk menjaga kualitas ekosistem perairan. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Nursiani et al., ditemukan bahwa pendangkalan di Sungai Pawan disebabkan oleh pengendapan sedimen yang berlebihan, yang dapat mengganggu ekosistem perairan dan mengurangi keanekaragaman hayati (Nursiani, Putra and Muhardi, 2020). Oleh karena itu, pengerukan sedimen harus dilakukan dengan mempertimbangkan dampak ekologisnya, sehingga tidak merusak habitat alami di sekitar sungai.

Aspek penting dalam pengerukan adalah pertimbangan metode yang digunakan untuk mengangkut sedimen. Pengerukan dan pengangkutan sedimen dari dasar bendung secara berkala dapat meningkatkan kinerja bendung dalam

mengairi lahan irigasi (Azmeri *et al.*, 2020). Hal ini menunjukkan bahwa pengerukan harus dilakukan secara terencana dan berkelanjutan untuk memastikan bahwa kapasitas aliran tetap terjaga, terutama di daerah yang rawan banjir.

Pengerukan sedimen tidak hanya berfungsi untuk meningkatkan kapasitas aliran, tetapi juga sebagai langkah mitigasi terhadap bencana alam yang dapat merugikan masyarakat. (Rustam *et al.*, 2018). Namun, pengerukan sedimen harus dilakukan dengan hati-hati untuk menghindari dampak negatif terhadap lingkungan. Pencemaran logam berat dalam sedimen dapat menjadi masalah serius yang perlu diperhatikan dalam proses pengerukan (Harnani and Titah, 2017). Oleh karena itu, analisis kualitas sedimen sebelum dan sesudah pengerukan sangat penting untuk memastikan bahwa aktivitas ini tidak menimbulkan risiko kesehatan bagi masyarakat dan ekosistem.

2. Sistem Bypass Sedimen

Salah satu pendekatan yang paling banyak digunakan adalah pembangunan terowongan bypass sedimen (SBT), yang dirancang untuk mengalirkan sedimen dari hulu ke hilir di sepanjang sungai yang terpengaruh oleh bendungan. SBT berfungsi untuk meniru pola aliran alami dan pengendapan sedimen, yang sangat penting untuk menjaga kesehatan ekosistem sungai dan mencegah sedimentasi berlebih di reservoir. Penelitian oleh Martín *et al.* menunjukkan bahwa SBT dapat beroperasi selama peristiwa aliran tinggi alami, yang penting untuk interaksi biotik dan abiotik serta fungsi ekosistem (Martín, Doering and Robinson, 2017). Dengan demikian, SBT tidak hanya berfungsi sebagai saluran untuk sedimen, tetapi juga sebagai alat untuk memelihara keseimbangan ekosistem sungai.

Sistem bypass sedimen juga memiliki implikasi yang signifikan terhadap morfologi sungai dan pola sedimentasi.

Dalam konteks ini, penelitian oleh Kuok et al. menunjukkan bahwa pembangunan saluran bypass di Sarawak River telah membantu mengurangi frekuensi banjir dengan mengalihkan aliran sedimen dan air dari daerah yang rentan terhadap genangan (Kuok, Chiu and Chin, 2021). Ini menunjukkan bahwa SBT tidak hanya berfungsi untuk mengelola sedimen, tetapi juga untuk mitigasi risiko banjir yang semakin meningkat akibat perubahan iklim dan urbanisasi yang cepat. Selain itu, penelitian oleh Kantoush et al. menyoroti pentingnya memahami dinamika aliran dan konsentrasi sedimen untuk mengevaluasi efisiensi bypass sedimen (Kantoush, Sumi and Murasaki, 2011). Hal ini menunjukkan bahwa pemantauan yang tepat dan analisis aliran sangat penting untuk keberhasilan sistem bypass sedimen.

Dari sudut pandang ekologis, SBT dapat memberikan manfaat jangka panjang bagi komunitas biota akuatik. Sebuah studi oleh Sueyoshi menunjukkan bahwa bypass sedimen dapat menghubungkan bagian hulu dan hilir dari sungai yang terhambat oleh bendungan, memungkinkan migrasi spesies ikan dan meningkatkan keragaman hayati di ekosistem sungai (Sueyoshi, 2023). Dengan demikian, SBT tidak hanya berfungsi untuk mengelola sedimen tetapi juga untuk mendukung keberlanjutan ekosistem sungai. Namun, penting untuk dicatat bahwa meskipun SBT memiliki banyak manfaat, ada juga tantangan yang terkait dengan biaya pembangunan dan pemeliharaan infrastruktur ini, (Foldvik *et al.*, 2022). Oleh karena itu, perencanaan yang matang dan evaluasi biaya-manfaat sangat penting dalam implementasi SBT.

3. Restorasi Bantaran Sungai

Berbagai strategi dan teknik restorasi telah dikembangkan untuk mengatasi masalah yang dihadapi oleh bantaran sungai, termasuk erosi, pencemaran, dan hilangnya keanekaragaman hayati. Penelitian menunjukkan bahwa restorasi bantaran sungai tidak hanya berfokus pada aspek

fisik, tetapi juga mempertimbangkan faktor sosial dan budaya yang mempengaruhi pengelolaan lingkungan di sekitar sungai (Oktarini, Hapsari and Triyuli, 2023).

Pendekatan yang efektif dalam restorasi bantaran sungai adalah penggunaan teknik bioengineering. Teknik ini melibatkan penggunaan bahan hidup, seperti tanaman, untuk memperkuat struktur tanah dan meningkatkan stabilitas bantaran sungai. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan tanaman seperti *Salix cheilophila* dan *Salix alba* dapat memberikan hasil yang baik dalam restorasi bantaran sungai, dengan meningkatkan panjang akar dan pertumbuhan vegetasi (Gu *et al.*, 2012). Selain itu, teknik bioengineering juga dapat meningkatkan keanekaragaman spesies dan kualitas habitat di sekitar bantaran sungai, yang sangat penting untuk mendukung ekosistem yang sehat (Schmitt *et al.*, 2018).

7.5 Inovasi Berkelanjutan

Inovasi berkelanjutan tidak hanya berfokus pada aspek teknis, tetapi juga mengintegrasikan nilai-nilai sosial, ekonomi, dan lingkungan untuk mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan. Pendekatan yang relevan, terpadu yang mempertimbangkan interaksi antara penggunaan lahan dan keberlanjutan ekosistem sungai.

7.5.1 Desain Bendungan Ramah Lingkungan

Pembangunan bendungan sering kali menjadi solusi untuk memenuhi kebutuhan energi dan pengelolaan air, tetapi dampak lingkungan yang ditimbulkan harus diperhatikan secara serius. Dalam konteks desain bendungan ramah lingkungan, penting untuk mempertimbangkan berbagai aspek yang dapat meminimalkan dampak negatif terhadap ekosistem dan masyarakat lokal. Oleh karena itu, pendekatan yang berkelanjutan dan terintegrasi dalam desain bendungan sangat diperlukan

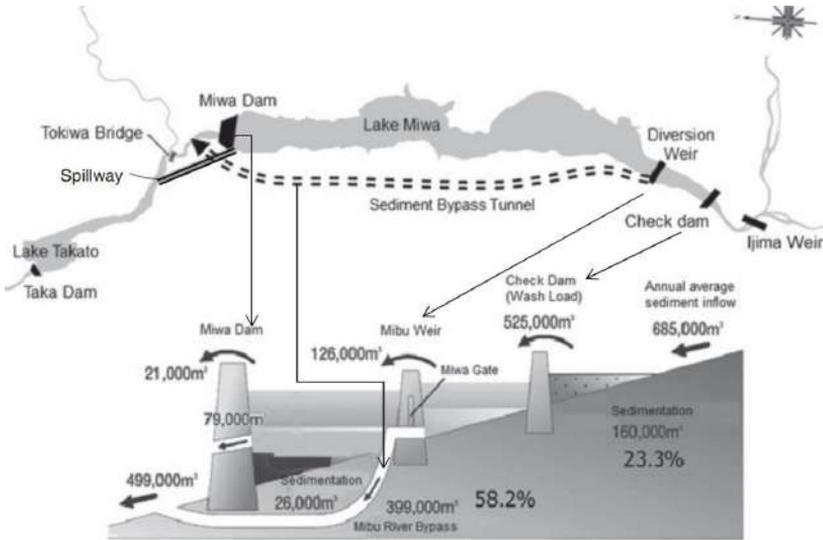
1. Integrasi dengan Ekosistem

Integrasi bendungan dengan ekosistem lokal menjadi kunci untuk mencapai keberlanjutan. Bendungan tidak hanya

berfungsi sebagai infrastruktur untuk pengendalian air, tetapi juga harus mempertimbangkan dampak lingkungan dan sosial yang ditimbulkan. Penelitian menunjukkan bahwa mitigasi risiko lingkungan dapat dilakukan melalui penjagaan ekosistem di sekitar bendungan, pemasangan saringan, dan pemantauan kualitas air, yang semuanya berkontribusi pada keberlanjutan bendungan (Salsabila and Anggraeni, 2023). Selain itu, analisis stabilitas tubuh bendungan sangat penting untuk memastikan bahwa desain bendungan dapat menahan rembesan air dan mendukung aliran air yang aman (Hidayatulloh, 2023).

Dampak bendungan terhadap ekosistem lokal sangat bervariasi, tergantung pada desain dan lokasi bendungan. Misalnya, bendungan dapat mengubah kondisi fisik dan biologis sungai, menciptakan dua kondisi ekosistem yang berbeda di hulu dan hilir bendungan (Cahyono, Budiharjo and Sugiyarto, 2018). Penelitian menunjukkan bahwa perbedaan kondisi fisik ini dapat mempengaruhi komposisi faktor biotik di dalamnya, yang pada gilirannya mempengaruhi keberagaman spesies dan kesehatan ekosistem secara keseluruhan (Shahab *et al.*, 2023). Oleh karena itu, penting untuk mempertimbangkan dampak jangka panjang dari pembangunan bendungan terhadap keanekaragaman hayati dan ekosistem lokal.

Perencanaan bendungan yang berkelanjutan juga mencakup pengelolaan sedimen yang efektif untuk menjaga kapasitas reservoir dan meminimalkan dampak lingkungan (Kondolf *et al.*, 2014). Pendekatan seperti pengelolaan aliran dan pengelolaan sedimen dapat membantu mempertahankan kesehatan ekosistem di sekitar bendungan. Selain itu, penelitian menunjukkan bahwa keterlibatan pemangku kepentingan dalam perencanaan dan evaluasi proyek sangat penting untuk memastikan bahwa proyek bendungan memenuhi kebutuhan lingkungan dan sosial. Keterlibatan ini dapat membantu mengidentifikasi potensi masalah sejak dini dan mengembangkan solusi yang lebih berkelanjutan.



Gambar 7.4. Pengelolaan sedimen di reservoir menggunakan sistem sedimen bypass
 Sumber : Kondolf *et al.*, 2014

2. Penggunaan Material Berkelanjutan

Salah satu aspek penting dari konsep ini adalah penggunaan material berkelanjutan yang tidak hanya memenuhi kebutuhan struktural tetapi juga meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan. Dalam konteks ini, material berkelanjutan mencakup berbagai jenis bahan yang dapat diperoleh secara lokal, memiliki daya tahan tinggi, dan dapat didaur ulang atau digunakan kembali. Misalnya, penggunaan beton precast yang dirancang dengan prinsip green building menunjukkan bagaimana material dapat dioptimalkan untuk efisiensi energi dan pengurangan limbah (Anuna, 2023).

Penerapan material berkelanjutan dalam pembangunan juga melibatkan pemilihan bahan yang memiliki jejak karbon rendah. Sebagai contoh, penggunaan agregat yang dihasilkan dari limbah konstruksi dapat mengurangi kebutuhan akan material baru dan mengurangi dampak lingkungan dari penggalian bahan baku (Irwanto, Sali and Khotimah, 2022). Selain itu, penggunaan bahan seperti bambu, yang dikenal sebagai material konstruksi berkelanjutan, juga menunjukkan

potensi besar dalam mengurangi dampak lingkungan, meskipun memerlukan teknik pengawetan yang ramah lingkungan untuk meningkatkan daya tahannya (Zr and Zuraida, 2017).

Penggunaan geomembran sebagai material inti dalam bendungan juga menunjukkan inovasi dalam desain yang ramah lingkungan. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan geomembran HDPE dapat mengurangi rembesan dan meningkatkan stabilitas bendungan, yang sangat penting dalam konteks keberlanjutan (Lastiasih, 2023). Dengan mengadopsi teknologi ini, proyek bendungan dapat mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan sekitar dan meningkatkan efisiensi operasional.

3. Sistem Drainase Alami

Bendungan sering kali mengubah pola aliran air dan mengurangi pasokan sedimen ke hilir, yang dapat mengakibatkan "kelaparan sedimen" yang berdampak negatif pada habitat akuatik dan keanekaragaman hayati (Ji *et al.*, 2022). Oleh karena itu, desain bendungan harus mempertimbangkan cara untuk meminimalkan dampak ini, seperti dengan menerapkan teknologi yang memungkinkan pengaliran sedimen yang lebih baik dan mempertahankan aliran air yang lebih alami.

Sistem drainase alami yang diintegrasikan dalam desain bendungan untuk meningkatkan efisiensi pengelolaan air. Drainase alami, seperti parit dan cekungan, dapat berfungsi sebagai area penyimpanan air selama periode hujan, serta membantu mengalirkan air ke sungai dan badan air lainnya selama periode kering (Graves, Mohapatra and Flatgard, 2020). Dengan memanfaatkan fitur-fitur alami ini, bendungan dapat dirancang untuk mendukung ekosistem lokal, meningkatkan kualitas air, dan mengurangi risiko banjir. Misalnya, penggunaan sistem Drainase Berkelanjutan (SuDS) dapat membantu mengelola aliran permukaan dan meningkatkan infiltrasi air ke dalam tanah, yang pada gilirannya dapat

mendukung keberlanjutan sumber daya air (Tah, Puay and Zakaria, 2018).

4. Teknologi Inovatif pada Bendungan

Teknologi inovatif memainkan peran kunci dalam merancang dan membangun bendungan yang tidak hanya memenuhi kebutuhan manusia, tetapi juga mempertimbangkan dampak lingkungan dan keberlanjutan. Salah satu aspek penting dari bendungan ramah lingkungan adalah pengelolaan sedimen yang berkelanjutan. Menurut Kondolf dan Farahani, banyak bendungan yang direncanakan atau sedang dibangun tidak dirancang untuk mengelola sedimen secara berkelanjutan, yang dapat menyebabkan masalah serius dalam jangka panjang (Kondolf and Farahani, 2018). Hal ini menunjukkan perlunya pendekatan yang lebih inovatif dalam desain bendungan untuk memastikan bahwa mereka dapat berfungsi dengan baik dalam jangka waktu yang lama.

Dalam konteks teknologi energi terbarukan, Konsep dasar dari bendungan ini tidak hanya berfokus pada penyimpanan air, tetapi juga pada pemanfaatan energi yang dihasilkan dari aliran air, seperti pembangkit listrik tenaga air (PLTA). PLTA memiliki keunggulan dalam hal biaya operasional yang rendah dan dampak lingkungan yang lebih kecil dibandingkan dengan sumber energi fosil (Muarifa, 2023). Pembangunan bendungan yang dirancang dengan mempertimbangkan aspek lingkungan dapat membantu mengurangi dampak negatif terhadap ekosistem lokal, serta mendukung program elektrifikasi di daerah terpencil (Muarifa, 2023).

Pemanfaatan energi matahari dan biomassa juga menjadi bagian penting dari pengembangan bendungan ramah lingkungan. Teknologi solar home system (SHS) dapat diintegrasikan dengan sistem bendungan untuk menyediakan energi listrik yang bersih dan berkelanjutan (sunardi *et al.*, 2021). Selain itu, penggunaan biomassa sebagai sumber energi alternatif dapat membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mendukung keberlanjutan lingkungan (Nelly, 2023). Dengan demikian, kombinasi dari berbagai

sumber energi terbarukan ini dapat meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan operasional bendungan.

Teknologi inovatif juga dapat mencakup penggunaan perangkat baru untuk mengelola sedimen di reservoir. Penelitian menunjukkan bahwa perangkat seperti SEDMIX dapat meningkatkan efisiensi pengelolaan sedimen dan membantu menjaga kapasitas reservoir (Amini, Chraïbi and Manso, 2020). Namun, performa SEDMIX di reservoir nyata masih memerlukan penelitian lebih lanjut untuk validasi (Amini, Chraïbi and Manso, 2020).

Bendungan yang dirancang dengan prinsip keberlanjutan dapat membantu mengurangi jejak karbon dan dampak lingkungan secara keseluruhan (Teshnizi, 2020). Dengan menerapkan prinsip-prinsip ini, kita dapat menciptakan infrastruktur yang tidak hanya memenuhi kebutuhan saat ini, tetapi juga menjaga sumber daya untuk generasi mendatang.

7.5.2 Infrastruktur Hijau untuk Manajemen Air

Infrastruktur hijau (IH) merupakan pendekatan yang mengacu pada jaringan area alami dan semi-natural yang dirancang untuk memberikan berbagai layanan ekosistem, termasuk pengelolaan air hujan dan peningkatan kualitas air. Infrastruktur hijau tidak hanya berfungsi untuk mengelola air, tetapi juga memberikan manfaat sosial, ekonomi, dan lingkungan yang signifikan dalam meningkatkan ketahanan dan keberlanjutan.

1. Taman Hujan

Infrastruktur hijau (*Green Infrastructure*), khususnya taman hujan, memainkan peran penting dalam manajemen air di lingkungan perkotaan. Taman hujan adalah salah satu bentuk infrastruktur hijau yang dirancang untuk mengelola limpasan air hujan dengan cara yang berkelanjutan. Mereka berfungsi untuk menyerap, menyimpan, dan mengolah air hujan, serta mengurangi risiko banjir dan meningkatkan kualitas air. Penelitian menunjukkan bahwa taman hujan dapat mengurangi volume limpasan dengan memanfaatkan proses alami seperti infiltrasi dan evapotranspirasi (Sharma and Malaviya, 2021).

Salah satu keuntungan utama dari taman hujan adalah kemampuannya untuk menyaring polutan dari air hujan sebelum mencapai saluran drainase. Taman hujan yang dirancang dengan baik dapat mengurangi akumulasi logam berat dan polutan lainnya, yang sering kali menjadi masalah di daerah perkotaan (Zhang, 2024). Selain itu, taman hujan juga berkontribusi terhadap peningkatan keanekaragaman hayati dengan menyediakan habitat bagi flora dan fauna lokal, serta meningkatkan kualitas lingkungan secara keseluruhan (Yusuf, 2023).

Implementasi taman hujan dalam perencanaan kota berkelanjutan juga sangat penting. Penelitian menunjukkan bahwa integrasi infrastruktur hijau dalam perencanaan kota dapat membantu mengatasi krisis air perkotaan dan meningkatkan ketahanan terhadap perubahan iklim (Sumaryana, Buchori and Sejati, 2022). Dengan mengadopsi taman hujan, kota-kota dapat mengurangi dampak negatif dari urbanisasi, seperti peningkatan suhu permukaan dan penurunan kapasitas resapan tanah. Oleh karena itu, perencanaan dan pengembangan taman hujan harus menjadi prioritas dalam upaya menciptakan kota yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan (Sumaryana, Buchori and Sejati, 2022).

Taman hujan juga menawarkan manfaat sosial dan ekonomi. Mereka dapat meningkatkan nilai properti di sekitarnya, menyediakan ruang terbuka untuk rekreasi, dan meningkatkan kualitas hidup masyarakat (Yusuf, 2023). Selain itu, taman hujan dapat mengurangi biaya pengelolaan air hujan dengan mengurangi kebutuhan untuk infrastruktur drainase tradisional yang mahal (Vineyard *et al.*, 2015). Dengan demikian, taman hujan tidak hanya berfungsi sebagai solusi teknis untuk manajemen air, tetapi juga sebagai elemen penting dalam menciptakan lingkungan perkotaan yang lebih sehat dan berkelanjutan.

2. Bioswale

Bioswale adalah saluran yang dirancang untuk mengalirkan air hujan sambil memfasilitasi infiltrasi ke dalam tanah, sehingga mengurangi limpasan permukaan dan meningkatkan penyerapan air. Penelitian menunjukkan bahwa bioswale dapat berfungsi efektif dalam mengendalikan genangan air, terutama di kawasan yang padat penduduk seperti Kota Kupang, di mana genangan sering menghambat mobilitas masyarakat (Asasty and Hindersah, 2022).

Konsep infrastruktur hijau, termasuk bioswale, berperan penting dalam mitigasi dampak perubahan iklim dan urbanisasi. Penelitian oleh Sumaryana et al. menunjukkan bahwa pengembangan infrastruktur hijau harus menjadi prioritas dalam perencanaan kota untuk menjamin keberlanjutan dan mengurangi dampak negatif dari perubahan tutupan lahan terhadap suhu permukaan (Sumaryana, Buchori and Sejati, 2022). Dengan demikian, bioswale tidak hanya berfungsi sebagai alat pengendali genangan, tetapi juga sebagai komponen penting dalam strategi manajemen air yang lebih luas dan berkelanjutan.

Implementasi bioswale juga dapat meningkatkan kualitas air dengan menyaring polutan sebelum air hujan mencapai saluran drainase. Penelitian oleh Priscannanda dan Hindersah menunjukkan bahwa infrastruktur hijau seperti bioswale dapat berkontribusi pada pengelolaan air yang lebih baik, dengan memanfaatkan proses alami untuk meningkatkan kualitas air (Priscannanda and Hindersah, 2022). Oleh karena itu, bioswale harus dipertimbangkan sebagai bagian integral dari infrastruktur hijau dalam konteks manajemen air perkotaan.

3. Atap Hijau

Atap hijau berfungsi sebagai sistem pengelolaan air hujan yang efektif, mengurangi limpasan air dan meningkatkan kualitas air. Penelitian menunjukkan bahwa atap hijau dapat mengurangi volume limpasan air hujan hingga 50% dibandingkan dengan atap konvensional, yang berkontribusi pada pengendalian genangan air di daerah perkotaan (Yusuf, 2023). Selain itu, atap

hijau juga berfungsi sebagai insulasi termal, yang membantu mengurangi efek pulau panas perkotaan dengan menurunkan suhu permukaan (Susca, Gaffin and Dell'Osso, 2011).

Implementasi atap hijau tidak hanya memberikan manfaat ekologis, tetapi juga dapat meningkatkan kualitas hidup masyarakat. Dengan menciptakan ruang hijau di lingkungan perkotaan, atap hijau dapat meningkatkan estetika bangunan dan menyediakan ruang untuk rekreasi (Sumaryana, Buchori and Sejati, 2022). Selain itu, atap hijau juga berkontribusi pada pengurangan polusi udara dengan menyerap karbon dioksida dan polutan lainnya (Susca, Gaffin and Dell'Osso, 2011). Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan area vegetasi, termasuk atap hijau, dapat secara signifikan mengurangi dampak negatif dari limpasan air hujan dan meningkatkan kualitas air di aliran sungai perkotaan (Deksissa, 2014)

4. Perkerasan Tembus Air

Perkerasan tembus air, yang dirancang untuk memungkinkan infiltrasi air hujan ke dalam tanah, berfungsi sebagai solusi efektif untuk mengurangi genangan dan meningkatkan kualitas air. Penelitian oleh Asasty dan Hindersah menunjukkan bahwa penerapan bioretensi sebagai salah satu bentuk infrastruktur hijau dapat mengendalikan genangan air di ruas jalan, yang sering kali menghambat mobilitas masyarakat (Asasty and Hindersah, 2022). Dengan menggunakan metode manajemen limpasan air hujan, analisis debit limpasan puncak dapat dilakukan untuk mengukur debit maksimal yang terjadi, sehingga memberikan gambaran yang jelas tentang efektivitas infrastruktur hijau dalam mengatasi masalah genangan (Asasty and Hindersah, 2022).

Perubahan tutupan lahan di daerah perkotaan juga berdampak signifikan terhadap suhu permukaan dan kualitas lingkungan. Sumaryana et al. menekankan bahwa pengembangan infrastruktur hijau harus menjadi prioritas dalam perencanaan kota yang berkelanjutan untuk memastikan keberlanjutan lingkungan (Sumaryana, Buchori and Sejati, 2022). Penelitian ini menunjukkan bahwa infrastruktur hijau tidak hanya

berfungsi untuk manajemen air, tetapi juga berkontribusi terhadap pengurangan suhu permukaan yang dapat meningkatkan kenyamanan hidup di kota (Sumaryana, Buchori and Sejati, 2022). Oleh karena itu, integrasi infrastruktur hijau dalam perencanaan kota menjadi sangat penting untuk menciptakan lingkungan yang lebih baik dan lebih berkelanjutan.

Perkerasan tembus air juga memiliki manfaat tambahan, seperti pengurangan efek panas dan peningkatan kualitas udara. Lu et al. menjelaskan bahwa ruang hijau yang diciptakan oleh pengembangan infrastruktur hijau dapat memberikan berbagai manfaat, termasuk peluang rekreasi dan peningkatan kualitas hidup (Lu *et al.*, 2013). Dengan demikian, perkerasan tembus air tidak hanya berfungsi untuk manajemen air, tetapi juga berkontribusi terhadap peningkatan kualitas lingkungan secara keseluruhan. Implementasi perkerasan tembus air dalam proyek infrastruktur hijau dapat menjadi langkah strategis untuk menciptakan kota yang lebih berkelanjutan dan nyaman untuk dihuni.

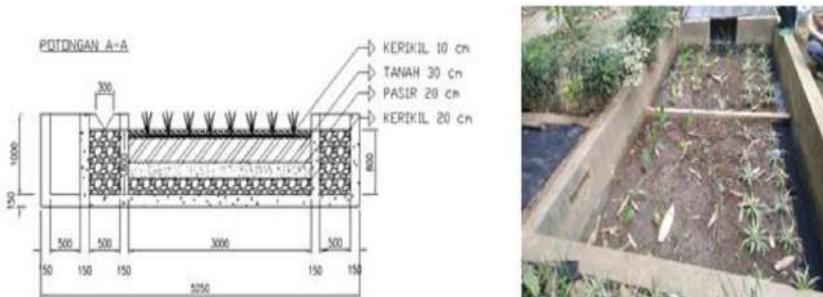
7.5.3 Infrastruktur Sungai Multifungsi

Infrastruktur sungai multifungsi merupakan pendekatan dalam perencanaan kota modern, terutama dalam konteks perubahan iklim dan urbanisasi yang cepat. Infrastruktur ini tidak hanya berfungsi untuk pengendalian banjir, tetapi juga berkontribusi terhadap keberlanjutan ekosistem dan peningkatan kualitas hidup masyarakat.

1. Lahan Basah Buatan

Lahan basah buatan, sebagai teknologi hijau, telah terbukti efektif dalam mengolah air limbah non-kakus, yang merupakan air buangan dari kegiatan rumah tangga. Penelitian oleh Haryani et al. menunjukkan bahwa penggunaan sistem aliran bawah permukaan dengan tanaman seperti akar wangi dan lili paris dapat meningkatkan kualitas air limbah yang diolah, sehingga dapat digunakan kembali dalam konteks yang lebih luas (Haryani, Hadisoebroto and Aryantie, 2019). Selain itu, Dewi menekankan bahwa lahan basah buatan dapat berfungsi

dengan baik menggunakan berbagai jenis tanaman, yang menunjukkan fleksibilitas sistem ini dalam pengolahan air limbah (Haryani, Hadisoebroto and Aryantie, 2019).



Gambar 7.5. Sistem lahan basah buatan

Sumber : Haryani, Hadisoebroto and Aryantie, 2019

Lahan basah buatan berkontribusi pada ketahanan iklim dan pengelolaan risiko banjir di perkotaan. Infrastruktur hijau yang mencakup lahan basah buatan dapat membantu mengurangi dampak perubahan iklim dengan menyediakan ruang bagi air dan meningkatkan kualitas lingkungan (Green *et al.*, 2021). Demuzere *et al.* menggarisbawahi bahwa infrastruktur hijau berfungsi sebagai jaring ekosistem multifungsi yang dapat meningkatkan ketahanan ekosistem dan memberikan manfaat bagi masyarakat (Demuzere *et al.*, 2014). Dengan demikian, integrasi lahan basah buatan dalam perencanaan kota dapat menciptakan lingkungan yang lebih berkelanjutan dan adaptif terhadap perubahan iklim.

Sistem lahan basah buatan juga dapat berfungsi sebagai habitat bagi berbagai spesies, yang mendukung keanekaragaman hayati di daerah perkotaan. Nakamura *et al.* mengusulkan bahwa lahan pertanian yang ditinggalkan dapat diubah menjadi infrastruktur hijau yang berfungsi untuk mengurangi risiko bencana dan menyediakan habitat bagi organisme yang beradaptasi dengan lingkungan lahan basah (Nakamura *et al.*, 2019). Dengan demikian, lahan basah buatan tidak hanya berfungsi untuk pengolahan air, tetapi juga untuk konservasi keanekaragaman hayati.

2. Taman Tepian Sungai

Penataan kawasan tepian sungai tidak hanya berfokus pada aspek estetika, tetapi juga pada fungsi sosial dan ekologis yang dapat meningkatkan kualitas hidup masyarakat. Dalam konteks ini, beberapa penelitian menunjukkan bahwa kawasan tepian sungai memiliki potensi besar untuk dikembangkan menjadi ruang publik yang interaktif dan ramah lingkungan.

Lebih lanjut, (Ulfa, 2024) mengidentifikasi berbagai aktivitas yang dapat dilakukan di kawasan tepian sungai, seperti aktivitas sosial dan rekreasi, yang dapat meningkatkan interaksi masyarakat. Penelitian ini menunjukkan bahwa keberadaan ruang terbuka publik di tepian sungai dapat mendorong masyarakat untuk beraktivitas di luar ruangan, sehingga meningkatkan kesehatan dan kesejahteraan. (Kholil, 2024) juga menyoroti pentingnya taman sebagai ruang terbuka yang dapat digunakan untuk rekreasi keluarga, meskipun tantangan terkait kebersihan dan pemeliharaan fasilitas tetap perlu diperhatikan.

Dalam konteks pengembangan ruang terbuka publik, (Agustian, 2023) menekankan perlunya penataan ruang yang berkelanjutan di kawasan tepian sungai. Penelitian ini menunjukkan bahwa penataan yang baik dapat meningkatkan kualitas lingkungan dan memberikan manfaat ekonomi bagi masyarakat. Selain itu, (Oktarini, 2022) menyoroti pentingnya akses ke sungai sebagai elemen kunci dalam desain ruang terbuka, yang dapat meningkatkan pengalaman pengguna dan mendorong aktivitas sosial.

DAFTAR PUSTAKA

- Afriyanie, D., Julian, M.M. and Nugraha, H. (2022) 'Urban Flood Resilience Through Spatial Plan in Bandung City, Indonesia', *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 986(1), p. 12052. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/986/1/012052>.
- Agustian, E. (2023) 'Konsep Penataan Ruang Berkelanjutan Pada Kawasan Tepian Sungai Musi Kota Palembang (Kasus: Kelurahan 5 Ulu Dan 7 Ulu, Kecamatan Seberang Ulu)', *Jurnal Planologi*, 20(1), p. 29. Available at: <https://doi.org/10.30659/jpsa.v20i1.29070>.
- Ali Al-Zankana, A.F., Matheson, T. and Harper, D.M. (2020) 'Secondary Production of Macroinvertebrates as Indicators of Success in Stream Rehabilitation', *River Research and Applications* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1002/rra.3762>.
- Amini, A., Chraïbi, A. and Manso, P. (2020) 'Numerical Simulations of an Innovative Water Stirring Device for Fine Sediment Release: The Case Study of the Future Trift Reservoir', pp. 967–978. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-15-5436-0_73.
- Amissah, G.J., Kiss, T. and Fiala, K. (2019) 'Active Point Bar Development and River Bank Erosion in the Incising Channel of the Lower Tisza River, Hungary', *Landscape & Environment*, 13(1), pp. 13–28. Available at: <https://doi.org/10.21120/le/13/1/2>.
- Anawar, H.M. and Chowdhury, R.K. (2020) 'Remediation of Polluted River Water by Biological, Chemical, Ecological and Engineering Processes', *Sustainability*, 12(17), p. 7017. Available at: <https://doi.org/10.3390/su12177017>.
- Angelopoulos, N. V., Cowx, I.G. and Buijse, A.D. (2017) 'Integrated Planning Framework for Successful River Restoration Projects: Upscaling Lessons Learnt From European Case Studies', *Environmental Science & Policy*, 76, pp. 12–22. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.06.005>.

- Anuna, P.M.N. (2023) 'Implementasi Beton Precast Dengan Konsep Green Building Pada Pembangunan Rumah Literasi Untuk Masyarakat', *Jurnal Teknik Sipil Terapan*, 5(3), p. 159. Available at: <https://doi.org/10.47600/jtst.v5i3.692>.
- Asasty, A.P.N. and Hindersah, H. (2022) 'Kajian Green Infrastructure Dalam Pengendalian Genangan Di Ruas Jalan Kota Kupang', *Bandung Conference Series Urban & Regional Planning*, 2(2), pp. 464–471. Available at: <https://doi.org/10.29313/bcsurp.v2i2.3529>.
- Azmeri, A. *et al.* (2020) 'Hidrodinamika Dan Produk Sedimen Terhadap Bendung Irigasi Keumala, Sungai Krueng Baro, Provinsi Aceh', *Jurnal Irigasi*, 15(1), pp. 1–14. Available at: <https://doi.org/10.31028/ji.v15.i1.1-14>.
- Becker, I. *et al.* (2022) 'Using the River Ecosystem Service Index to Evaluate "Free Moving Rivers" restoration Measures: A Case Study on the Ammer River (Bavaria)', *Internationale Revue Der Gesamten Hydrobiologie Und Hydrographie*, 107(1–2), pp. 117–127. Available at: <https://doi.org/10.1002/iroh.202102088>.
- Beechie, T.J. *et al.* (2010) 'Process-Based Principles for Restoring River Ecosystems', *Bioscience*, 60(3), pp. 209–222. Available at: <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.3.7>.
- Cahyono, R.N., Budiharjo, A. and Sugiyarto, S. (2018) 'Keragaman Dan Pengelompokan Ikan Berdasarkan Karakter Morfologi Di Ekosistem Bendungan Colo Sukoharjo Jawa Tengah', *Depik*, 7(1), pp. 9–21. Available at: <https://doi.org/10.13170/depik.7.1.9886>.
- Cavaillé, P. *et al.* (2015) 'Functional and Taxonomic Plant Diversity for Riverbank Protection Works: Bioengineering Techniques Close to Natural Banks and Beyond Hard Engineering', *Journal of Environmental Management*, 151, pp. 65–75. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.09.028>.
- Chin, A. and Gregory, K.J. (2005) 'Managing Urban River Channel Adjustments', *Geomorphology*, 69(1–4), pp. 28–45. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.10.009>.

- Cliilverd, H.M. *et al.* (2016) 'Coupled Hydrological/Hydraulic Modelling of River Restoration Impacts and Floodplain Hydrodynamics', *River Research and Applications*, 32(9), pp. 1927–1948. Available at: <https://doi.org/10.1002/rra.3036>.
- Death, R.G., Fuller, I.C. and Macklin, M.G. (2015) 'Resetting the River Template: The Potential for Climate-related Extreme Floods to Transform River Geomorphology and Ecology', *Freshwater Biology*, 60(12), pp. 2477–2496. Available at: <https://doi.org/10.1111/fwb.12639>.
- Deksissa, T. (2014) 'GIS-Based Ecosystem Service Analysis of Green Infrastructure', *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*, 03(12), pp. 17778–17784. Available at: <https://doi.org/10.15680/ijirset.2014.0312006>.
- Demuzere, M. *et al.* (2014) 'Mitigating and Adapting to Climate Change: Multi-Functional and Multi-Scale Assessment of Green Urban Infrastructure', *Journal of Environmental Management*, 146, pp. 107–115. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.025>.
- Deng, S. *et al.* (2021) 'Secondary Flow and Flow Redistribution in Two Sharp Bends on the Middle Yangtze River', *Water Resources Research*, 57(10). Available at: <https://doi.org/10.1029/2020wr028534>.
- Ekka, A. *et al.* (2020) 'Anthropogenic Modifications and River Ecosystem Services: A Landscape Perspective', *Water*, 12(10), p. 2706. Available at: <https://doi.org/10.3390/w12102706>.
- England, J. *et al.* (2021) 'Evidence of Taxonomic and Functional Recovery of Macroinvertebrate Communities Following River Restoration', *Water*, 13(16), p. 2239. Available at: <https://doi.org/10.3390/w13162239>.
- Foldvik, A. *et al.* (2022) 'Combining Fish Passage and Sediment Bypassing: A Conceptual Solution for Increased Sustainability of Dams and Reservoirs', *Water*, 14(12), p. 1977. Available at: <https://doi.org/10.3390/w14121977>.
- Ghasypham, Z.D. (2023) 'Rancang Bangun Deteksi Ketinggian Dan Debit Air Pada Pertemuan Tiga Aliran Sungai Berbasis

- Internet of Things', *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, 11(3s1). Available at: <https://doi.org/10.23960/jitet.v11i3s1.3564>.
- Graves, J.K., Mohapatra, R.P. and Flatgard, N. (2020) 'Drainage Ditch Berm Delineation Using Lidar Data: A Case Study of Waseca County, Minnesota', *Sustainability*, 12(22), p. 9600. Available at: <https://doi.org/10.3390/su12229600>.
- Green, D. *et al.* (2021) 'Green Infrastructure: The Future of Urban Flood Risk Management?', *Wiley Interdisciplinary Reviews Water*, 8(6). Available at: <https://doi.org/10.1002/wat2.1560>.
- Gu, L. *et al.* (2012) 'Soil Bioengineering - A New Technique to Generate Riverbank Restoration', *Advanced Materials Research*, 518-523, pp. 1795-1799. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.518-523.1795>.
- Gurnell, A.M. *et al.* (2011) 'Gradients in the Biophysical Structure of Urban Rivers and Their Association With River Channel Engineering', *River Research and Applications*, 28(7), pp. 908-925. Available at: <https://doi.org/10.1002/rra.1487>.
- Hamzah, A. (2022) 'Pemanfaatan Ozon Sebagai Teknologi Berkelanjutan Daur Ulang Air Limbah Domestik Hotel X Lembang', *Insologi Jurnal Sains Dan Teknologi*, 1(2), pp. 96-103. Available at: <https://doi.org/10.55123/insologi.v1i2.234>.
- Harnani, B.R.D. and Titah, H.S. (2017) 'Kemampuan *Avicennia Alba* Untuk Menurunkan Konsentrasi Tembaga (Cu) Di Muara Sungai Wonorejo, Surabaya', *Jurnal Teknik Its*, 6(2). Available at: <https://doi.org/10.12962/j23373539.v6i2.23855>.
- Haryani, M.F., Hadisoebroto, R. and Aryantie, M.H. (2019) 'Pengolahan Air Limbah Non Kakus Permukiman Menggunakan Lahan Basah Buatan Sebagai Pilihan Layanan Dasar Lingkungan Perkotaan', *Seminar Nasional Pembangunan Wilayah Dan Kota Berkelanjutan*, 1(1). Available at: <https://doi.org/10.25105/pwkb.v1i1.5272>.
- Hidayatulloh, A.Y. (2023) 'Analisa Tegangan Pada Bendungan Cijurey Kabupaten Bogor, Jawa Barat', *Jurnal Teknologi Dan*

- Rekayasa Sumber Daya Air*, 3(2), pp. 125–136. Available at: <https://doi.org/10.21776/ub.jtresda.2023.003.02.011>.
- Irwanto, T.J., Sali, A.B.S. and Khotimah, K. (2022) 'Pemanfaatan Limbah Konstruksi Untuk Timbunan Jalan Desa Di Dsn. Nglundo Kecamatan Sukomoro Kabupaten Nganjuk', *Jurnal Pengabdian Teknik Dan Sains (Jpts)*, 2(01). Available at: <https://doi.org/10.30595/jpts.v2i01.13100>.
- James, L.A. (2015) 'Designing Forward With an Eye to the Past: Morphogenesis of the Lower Yuba River', *Geomorphology*, 251, pp. 31–49. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.07.009>.
- Janssen, P. *et al.* (2019) 'How Maintenance and Restoration Measures Mediate the Response of Riparian Plant Functional Composition to Environmental Gradients on Channel Margins: Insights From a Highly Degraded Large River', *The Science of the Total Environment*, 656, pp. 1312–1325. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.434>.
- Ji, H. *et al.* (2022) 'Damming-Induced Hydrogeomorphic Transition in Downstream Channel and Delta: A Case Study of the Yellow River, China', *Water*, 14(13), p. 2079. Available at: <https://doi.org/10.3390/w14132079>.
- Kantoush, S.A., Sumi, T. and Murasaki, M. (2011) 'Evaluation of Sediment Bypass Efficiency by Flow Field and Sediment Concentration Monitoring Techniques', *Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser B1 (Hydraulic Engineering)*, 67(4), p. I_169-I_174. Available at: https://doi.org/10.2208/jscejhe.67.i_169.
- Kholil, K. (2024) 'Pendampingan Pembentukan Pokliman Taman Tjimanoeke Indramayu', *Reswara Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 5(1), pp. 193–201. Available at: <https://doi.org/10.46576/rjpkm.v5i1.3820>.
- Kondolf, G.M. *et al.* (2014) 'Sustainable Sediment Management in Reservoirs and Regulated Rivers: Experiences From Five Continents', *Earth S Future*, 2(5), pp. 256–280. Available at: <https://doi.org/10.1002/2013ef000184>.

- Kondolf, G.M. and Farahani, A. (2018) 'Sustainably Managing Reservoir Storage: Ancient Roots of a Modern Challenge', *Water*, 10(2), p. 117. Available at: <https://doi.org/10.3390/w10020117>.
- Konrad, C.P., Warner, A.T. and Higgins, J. (2011) 'Evaluating Dam Re-operation for Freshwater Conservation in the Sustainable Rivers Project', *River Research and Applications*, 28(6), pp. 777–792. Available at: <https://doi.org/10.1002/rra.1524>.
- Kuok, K.K., Chiu, P.C. and Chin, M.Y. (2021) 'Sarawak River Flow Behaviour After Matang Bypass Channel Construction During Low Tide Using InfoWorks River Simulation (RS)', *Journal of Environmental Protection*, 12(01), pp. 36–48. Available at: <https://doi.org/10.4236/jep.2021.121004>.
- Lane, R. and Kay, A.L. (2021) 'Climate Change Impact on the Magnitude and Timing of Hydrological Extremes Across Great Britain', *Frontiers in Water*, 3. Available at: <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.684982>.
- Lastiasih, Y. (2023) 'Alternatif Perencanaan Inti Tubuh Bendungan Semantok Menggunakan Geomembran', *Jurnal Teknik Hidraulik*, 14(2), pp. 105–118. Available at: <https://doi.org/10.32679/jth.v14i2.742>.
- Lu, Z. *et al.* (2013) 'Use of Impact Fees to Incentivize Low-Impact Development and Promote Compact Growth', *Environmental Science & Technology*, 47(19), pp. 10744–10752. Available at: <https://doi.org/10.1021/es304924w>.
- Martín, E.J., Doering, M. and Robinson, C.T. (2017) 'Ecological Assessment of a Sediment By-pass Tunnel on a Receiving Stream in Switzerland', *River Research and Applications*, 33(6), pp. 925–936. Available at: <https://doi.org/10.1002/rra.3145>.
- Muarifa, I.D. (2023) 'Pemberdayaan Air Sebagai Sumber Energi Listrik Terbaru Untuk Mendukung Program Elektrifikasi Di Indonesia', *Jurnal Sains Riset*, 13(3), pp. 729–735. Available at: <https://doi.org/10.47647/jsr.v13i2.1614>.
- Nakamura, F. *et al.* (2019) 'Adaptation to Climate Change and Conservation of Biodiversity Using Green Infrastructure', *River Research and Applications*, 36(6), pp. 921–933.

Available at: <https://doi.org/10.1002/rra.3576>.

- Nelly, N. (2023) 'Potensi Ekonomi Energi Terbarukan Biomassa: Permasalahan Dan Kendala Pengembangannya', *Jurnal Serambi Engineering*, 8(3). Available at: <https://doi.org/10.32672/jse.v8i3.6448>.
- Nursiani, T., Putra, Y.S. and Muhandi, M. (2020) 'Sebaran Fraksi Dan Jenis Sedimen Dasar (Bed-Load) Di Sungai Pawan Kecamatan Delta Pawan Kabupaten Ketapang', *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 6(2), p. 253. Available at: <https://doi.org/10.24843/jmas.2020.v06.i02.p13>.
- Oktarini, M.F. (2022) 'Penataan Ruang Terbuka Publik Sebagai Wadah Aktivitas Warga Pada Permukiman Di Tepian Sungai Musi, Palembang', *Archvisual Jurnal Arsitektur Dan Perencanaan*, 2(1), pp. 7–18. Available at: <https://doi.org/10.55300/archvisual.v2i1.1480>.
- Oktarini, M.F., Hapsari, H. and Triyuli, W. (2023) 'The Social and Cultural Aspects of Waste Disposal Management in the Planning Revitalization of Riverbank Settlement', *Humaniora*, 14(1), pp. 31–38. Available at: <https://doi.org/10.21512/humaniora.v14i1.7877>.
- Pahrijal, R. (2023) 'Mengubah Sampah Menjadi Harta Karun: Inovasi Daur Ulang Yang Menguntungkan Lingkungan Dan Ekonomi (Studi Literature)', *Jurnal Multidisiplin West Science*, 2(06), pp. 483–492. Available at: <https://doi.org/10.58812/jmws.v2i6.430>.
- Palmer, M.A. *et al.* (2005) 'Standards for Ecologically Successful River Restoration', *Journal of Applied Ecology*, 42(2), pp. 208–217. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2005.01004.x>.
- Pierson, T.C. and Major, J.J. (2014) 'Hydrogeomorphic Effects of Explosive Volcanic Eruptions on Drainage Basins', *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42(1), pp. 469–507. Available at: <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060313-054913>.
- Polvi, L.E. and Sarneel, J.M. (2017) 'Ecosystem Engineers in Rivers: An Introduction to How and Where Organisms Create Positive Biogeomorphic Feedbacks', *Wiley Interdisciplinary*

- Reviews Water*, 5(2). Available at: <https://doi.org/10.1002/wat2.1271>.
- Prathaithep, W.B. *et al.* (2022) 'Enhancing Flood Management Plan (FMP) Through Integration Strategic Environmental Assessment (SEA) in Thailand: The Case of Ayutthaya', *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 17(4), pp. 1101–1115. Available at: <https://doi.org/10.18280/ijstdp.170407>.
- Priscannanda, F. and Hindersah, H. (2022) 'Identifikasi Kemampuan Berbagai Jenis Green Infrastructure Dalam Upaya Mengurangi Banjir Pada Das Ciliwung Hilir DKI Jakarta', *Jurnal Riset Perencanaan Wilayah Dan Kota*, pp. 23–35. Available at: <https://doi.org/10.29313/jrpk.v2i1.756>.
- Raut, R. and Gudmestad, O.T. (2018) 'Use of Bioengineering Techniques to Prevent Landslides in Nepal for Hydropower Development', *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 12(4), pp. 418–427. Available at: <https://doi.org/10.2495/dne-v12-n4-418-427>.
- Rheinheimer, D.E. and Viers, J.H. (2014) 'Combined Effects of Reservoir Operations and Climate Warming on the Flow Regime of Hydropower Bypass Reaches of California's Sierra Nevada', *River Research and Applications*, 31(3), pp. 269–279. Available at: <https://doi.org/10.1002/rra.2749>.
- Rosen, T. and Xu, Y.J. (2014) 'A Hydrograph-Based Sediment Availability Assessment: Implications for Mississippi River Sediment Diversion', *Water*, 6(3), pp. 564–583. Available at: <https://doi.org/10.3390/w6030564>.
- Rustam, A. *et al.* (2018) 'Karakteristik Sebaran Sedimen Dan Laju Sedimentasi Perairan Teluk Banten', *Jurnal Segara*, 14(3). Available at: <https://doi.org/10.15578/segara.v14i3.7351>.
- Rustandi, D. *et al.* (2021) 'Automatic Waste Transport Equipment in the River Integrated With the SCADA System'. Available at: <https://doi.org/10.2991/assehr.k.210203.120>.
- Salsabila, A.H. and Anggraeni, I.A.A. (2023) 'Manajemen Risiko Lingkungan Bendungan Wadaslintang', *Jurnal Teknik Sipil*, 19(1), pp. 82–97. Available at: <https://doi.org/10.28932/jts.v19i1.5393>.

- Schmitt, K. *et al.* (2018) 'River Bank Stabilisation by Bioengineering: Potentials for Ecological Diversity', *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 6(4), pp. 262–273. Available at: <https://doi.org/10.1080/23249676.2018.1466735>.
- Serra-Llobet, A. *et al.* (2022) 'Restoring Rivers and Floodplains for Habitat and Flood Risk Reduction: Experiences in Multi-Benefit Floodplain Management From California and Germany', *Frontiers in Environmental Science* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.778568>.
- Shah, P. and Dahal, K. (2023) 'Problems Associated With the Implementation of Bioengineering in Hill Road Construction in Nepal', *American Journal of Agricultural Science Engineering and Technology*, 7(2), pp. 7–15. Available at: <https://doi.org/10.54536/ajaset.v7i2.1383>.
- Shahab, A. *et al.* (2023) 'Ecological Impact Assessment of Dam Construction: A Case Study of Diamer Basha Dam Gilgit-Baltistan, Pakistan', *River Research and Applications*, 39(6), pp. 1160–1172. Available at: <https://doi.org/10.1002/rra.4131>.
- Sharma, R. and Malaviya, P. (2021) 'Management of Stormwater Pollution Using Green Infrastructure: The Role of Rain Gardens', *Wiley Interdisciplinary Reviews Water*, 8(2). Available at: <https://doi.org/10.1002/wat2.1507>.
- Shen, Z. *et al.* (2021) 'Engineered Continental-Scale Rivers Can Drive Changes in the Carbon Cycle', *Agu Advances*, 2(1). Available at: <https://doi.org/10.1029/2020av000273>.
- Sobirov, F.C. (2024) 'Research of Deformation Processes of Amu-Bukhara Canal and Increase of Water Permeability', *Bio Web of Conferences*, 103, p. 36. Available at: <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410300036>.
- Spink, A., Fryirs, K. and Brierley, G. (2008) 'The Relationship Between Geomorphic River Adjustment and Management Actions Over the Last 50 Years in the Upper Hunter Catchment, NSW, Australia', *River Research and Applications*, 25(7), pp. 904–928. Available at: <https://doi.org/10.1002/rra.1197>.

- Suedel, B.C. *et al.* (2021) 'Beneficial Use of Dredged Sediment as a Sustainable Practice for Restoring Coastal Marsh Habitat', *Integrated Environmental Assessment and Management*, 18(5), pp. 1162–1173. Available at: <https://doi.org/10.1002/ieam.4501>.
- Suharini, E. and Kurniawan, E. (2019) 'Pelatihan Sistem Peringatan Dini Banjir Berbasis Masyarakat Kelurahan Sampangan Kecamatan Gajahmungkur Kota Semarang Guna Mewujudkan Masyarakat Tanggap Bencana', *Jurnal Panjar Pengabdian Bidang Pembelajaran*, 1(2), pp. 114–117. Available at: <https://doi.org/10.15294/panjar.v1i2.29718>.
- Sumaryana, H., Buchori, I. and Sejati, A.W. (2022) 'Dampak Perubahan Tutupan Lahan Terhadap Suhu Permukaan Di Perkotaan Temanggung: Menuju Realisasi Program Infrastruktur Hijau', *Majalah Geografi Indonesia*, 36(1), p. 68. Available at: <https://doi.org/10.22146/mgi.70978>.
- sunardi, sunardi s. *et al.* (2021) 'Optimalisasi Pemanfaatan SHM (Solar Home System) Sebagai Pembangkit Energi Listrik Ramah Lingkungan', *Eksergi*, 17(2), p. 76. Available at: <https://doi.org/10.32497/eksergi.v17i2.2165>.
- Susca, T., Gaffin, S.R. and Dell'Osso, G.R. (2011) 'Positive Effects of Vegetation: Urban Heat Island and Green Roofs', *Environmental Pollution*, 159(8–9), pp. 2119–2126. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.03.007>.
- Tah, A.S., Puay, H.T. and Zakaria, N.A. (2018) 'Mathematical Modelling of One-Dimensional Overland Flow on a Porous Surface', *E3s Web of Conferences*, 65, p. 7002. Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186507002>.
- Tenda, E.P., Lengkong, A. V and Pinontoan, K.F. (2021) 'Sistem Peringatan Dini Banjir Berbasis IoT Dan Twitter', *Cogito Smart Journal*, 7(1), pp. 26–39. Available at: <https://doi.org/10.31154/cogito.v7i1.284.26-39>.
- Teshnizi, E.S. (2020) "Investigating the Design Features of CSG Dams", *JoJ Sciences*, 2(3). Available at: <https://doi.org/10.19080/jojs.2020.02.555588>.
- Tickner, D. *et al.* (2020) 'Bending the Curve of Global Freshwater Biodiversity Loss: An Emergency Recovery Plan', *Bioscience*

- [Preprint]. Available at:
<https://doi.org/10.1093/biosci/biaa002>.
- Ulfa, A. (2024) 'Kajian Aktivitas Berdasarkan Kondisi Lingkungan Pada Kawasan Tepian Sungai Cikapundung', *Archvisual Jurnal Arsitektur Dan Perencanaan*, 3(2), pp. 58–70. Available at: <https://doi.org/10.55300/archvisual.v3i2.2232>.
- Vineyard, D. *et al.* (2015) 'Comparing Green and Grey Infrastructure Using Life Cycle Cost and Environmental Impact: A Rain Garden Case Study in Cincinnati, <sc>OH</Sc>', *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 51(5), pp. 1342–1360. Available at: <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12320>.
- Wang, B. and Xu, Y.J. (2018) 'Decadal-Scale Riverbed Deformation and Sand Budget of the Last 500 km of the Mississippi River: Insights Into Natural and River Engineering Effects on a Large Alluvial River', *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 123(5), pp. 874–890. Available at: <https://doi.org/10.1029/2017jf004542>.
- Wankhede, V.A. *et al.* (2023) 'Artificial Intelligence an Enabler for Sustainable Engineering Decision-Making in Uncertain Environment: A Review and Future Propositions', *Journal of Global Operations and Strategic Sourcing*, 17(2), pp. 384–401. Available at: <https://doi.org/10.1108/jgoss-06-2022-0057>.
- Wohl, E., Lane, S.N. and Wilcox, A.C. (2015) 'The Science and Practice of River Restoration', *Water Resources Research* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1002/2014wr016874>.
- Yusuf, R. (2023) 'Peran Perencanaan Kota Berkelanjutan Dalam Mengatasi Krisis Air Perkotaan: Integrasi Infrastruktur Hijau, Teknologi Pemantauan, Dan Kebijakan Publik', *Jurnal Multidisiplin West Science*, 2(09), pp. 770–779. Available at: <https://doi.org/10.58812/jmws.v2i09.628>.
- Zhang, Z. (2024) 'Pollutant Accumulation and Microbial Community Evolution in Rain Gardens With Different Drainage Types at Field Scale', *Scientific Reports*, 14(1). Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48255-6>.

- Zr, D.L. and Zuraida, S. (2017) 'Mitigasi Emisi Pengawetan Bambu Sebagai Material Konstruksi Berkelanjutan', *Jurnal Lingkungan Binaan Indonesia*, 6(2), pp. 88–93. Available at: <https://doi.org/10.32315/jlbi.6.2.107>.
- Zunariyah, S., Suharko, S. and Suharman, S. (2022) 'Proses Politik Berlapis Dalam Gerakan Restorasi Sungai Studi Kasus Sungai Gajah Wong Yogyakarta', *Jurnal Analisa Sosiologi*, 11(2). Available at: <https://doi.org/10.20961/jas.v11i2.60645>.

BAB 8

MANAJEMEN SEDIMEN DAN MORFODINAMIK SUNGAI

Oleh Mahmuddin

8.1 Pendahuluan

Manajemen sedimen dan morfodinamik sungai adalah bidang studi yang penting dalam ilmu lingkungan dan rekayasa sumber daya air. Sedimen adalah partikel-partikel tanah, pasir, dan bahan organik yang diangkut oleh aliran air dan diendapkan di dasar sungai. Proses morfodinamik sungai melibatkan interaksi kompleks antara aliran air dan sedimen, yang membentuk dan mengubah morfologi sungai dari waktu ke waktu (Yayuk Apriyanti, 2016).

Sungai, sebagai sistem alam yang dinamis, senantiasa mengalami perubahan bentuk dan pola alirannya. Perubahan-perubahan ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, baik alami maupun akibat aktivitas manusia. Salah satu faktor penting yang memengaruhi dinamika sungai adalah proses sedimentasi, yaitu proses pengendapan material sedimen yang terbawa oleh aliran air. Proses sedimentasi ini sangat erat kaitannya dengan konsep morfodinamik sungai, yang mengkaji hubungan antara bentuk sungai, aliran air, dan sedimen (Thorne, 1990).

Manajemen sedimen merupakan upaya sistematis untuk memahami, memprediksi, dan mengendalikan proses sedimentasi dalam suatu sistem sungai. Tujuan utama dari manajemen sedimen adalah untuk mencegah terjadinya dampak negatif akibat sedimentasi yang berlebihan, seperti pendangkalan sungai, banjir, erosi pantai, dan kerusakan ekosistem (Walling, 2009).

Dalam konteks perubahan iklim global yang semakin intensif, manajemen sedimen menjadi semakin krusial. Peningkatan frekuensi dan intensitas kejadian ekstrem seperti banjir dan kekeringan dapat mempercepat laju erosi dan sedimentasi. Selain

itu, pembangunan infrastruktur yang tidak terkendali, perubahan tata guna lahan, dan eksploitasi sumber daya alam yang berlebihan juga turut berkontribusi terhadap masalah sedimentasi (Knighton, 1998).

Morfodinamik sungai adalah cabang ilmu yang mempelajari interaksi antara bentuk sungai, aliran air, dan sedimen. Konsep ini sangat penting dalam memahami proses-proses yang terjadi di dalam sistem sungai, seperti erosi, transportasi, dan deposisi sedimen. Dengan memahami konsep morfodinamik, kita dapat memprediksi perubahan bentuk sungai akibat berbagai faktor, baik alami maupun akibat aktivitas manusia (Simon, 2006).

Manajemen sedimen menghadapi berbagai tantangan, antara lain (UNESCO, 2017):

1. Kompleksitas sistem sungai: Sistem sungai merupakan sistem yang kompleks dan dinamis, sehingga sulit untuk diprediksi secara akurat.
2. Keterbatasan data: Data yang diperlukan untuk melakukan analisis morfodinamik seringkali terbatas, terutama di daerah-daerah yang sulit diakses.
3. Konflik kepentingan: Terdapat berbagai kepentingan yang saling bertentangan dalam pengelolaan sungai, seperti kepentingan pertanian, industri, dan konservasi.
4. Perubahan iklim: Perubahan iklim semakin meningkatkan ketidakpastian dalam pengelolaan sungai.

Bab ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang komprehensif tentang manajemen sedimen dan morfodinamik sungai. Materi yang akan dibahas meliputi :

1. Fenomena dasar morfodinamik sungai
2. Faktor-faktor yang mempengaruhi sedimentasi
3. Dampak sedimentasi terhadap lingkungan dan masyarakat
4. Metode pengendalian sedimentasi
5. Studi kasus manajemen sedimen di berbagai belahan dunia

8.2 Fenomena dasar morfodinamik sungai

Fenomena morfodinamik sungai mencakup berbagai proses fisik yang membentuk dan mengubah morfologi sungai. Kajian ini

penting untuk memahami dinamika aliran air dan sedimen, serta dampaknya terhadap ekosistem dan keberlanjutan sumber daya air. Pendahuluan ini akan memberikan gambaran umum tentang pentingnya studi morfodinamik sungai, latar belakang penelitian, serta tujuan dan manfaat yang diharapkan dari kajian ini (Knighton, 1998).

8.2.1 Konsep Dasar Morfodinamik Sungai

Morfodinamik sungai adalah studi tentang proses-proses fisik yang mengatur bentuk dan perubahan morfologi sungai dari waktu ke waktu. Proses-proses ini melibatkan interaksi antara aliran air, sedimen, dan struktur geologi di sepanjang sungai. Pemahaman tentang morfodinamik sungai sangat penting untuk mengelola dan melestarikan ekosistem sungai, serta untuk merancang infrastruktur yang tahan terhadap perubahan lingkungan.

Prinsip-Prinsip Dasar Morfodinamik Sungai sebagai berikut:

1. **Aliran Air dan Gaya Hidraulik:** Aliran air di sungai dapat bersifat laminar atau turbulen. Pada aliran laminar, air bergerak dalam lapisan-lapisan yang paralel, sedangkan pada aliran turbulen, air bergerak secara acak dan terjadi pencampuran intens antar lapisan (Garcia, 2008). Gaya hidraulik yang bekerja di sungai mencakup gaya gravitasi, gaya gesek, dan gaya angkat yang semuanya mempengaruhi kecepatan dan arah aliran air (Julien, 2002).
2. **Erosi dan Transportasi Sedimen:** Erosi terjadi ketika aliran air memiliki energi yang cukup untuk mengikis dan mengangkat material dari dasar dan tebing sungai. Material yang tererosi ini kemudian diangkut oleh aliran air sebagai sedimen. Transportasi sedimen dapat terjadi melalui bedload (partikel besar yang bergulir di dasar sungai), suspended load (partikel halus yang tersuspensi dalam aliran air), dan dissolved load (partikel terlarut) (Knighton, 1998). Erosi dan transportasi sedimen memainkan peran kunci dalam membentuk morfologi sungai.
3. **Deposisi Sedimen:** Deposisi sedimen terjadi ketika kecepatan aliran air berkurang, sehingga partikel-partikel sedimen yang diangkut mulai mengendap di dasar sungai.

Proses deposisi ini penting dalam pembentukan fitur-fitur geomorfologis seperti delta, alluvial fans, dan bantaran sungai (John P. Miller, 1995).

4. Interaksi antara Aliran Air dan Sedimen: Interaksi antara aliran air dan sedimen adalah inti dari morfodinamik sungai. Aliran air yang kuat dapat mengangkut lebih banyak sedimen, sedangkan aliran air yang lambat cenderung mengendapkan sedimen. Interaksi ini menciptakan berbagai bentuk sungai seperti meander, straight channels, dan braided rivers (Richards, 1982).
5. Pengaruh Faktor Eksternal: Faktor-faktor eksternal seperti curah hujan, perubahan iklim, aktivitas manusia, dan vegetasi di sepanjang aliran sungai juga mempengaruhi morfodinamik sungai. Misalnya, aktivitas deforestasi dapat meningkatkan erosi dan sedimentasi di sungai (Schumm, 1977).

Pemahaman tentang morfodinamik sungai sangat penting bagi para ilmuwan dan insinyur dalam merancang infrastruktur yang ramah lingkungan dan tahan terhadap perubahan alami. Penelitian morfodinamik juga membantu dalam pengelolaan sumber daya air, mitigasi bencana banjir, dan konservasi habitat alami di sepanjang aliran sungai.

8.2.2 Dinamika Aliran Sungai

Dinamika aliran sungai mencakup berbagai aspek yang mempengaruhi sifat dan perilaku aliran air dalam sistem sungai. Aliran air dapat bersifat laminar atau turbulen, tergantung pada kecepatan aliran dan topografi sungai. Pada aliran laminar, air bergerak dalam lapisan paralel tanpa adanya campuran antar lapisan, sementara pada aliran turbulen, terdapat pencampuran yang intens antara lapisan air, menciptakan vorteks dan arus turbulen (Julien, 2002).

Kecepatan aliran dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti kemiringan dasar sungai, debit air, dan hambatan yang diakibatkan oleh material dasar sungai. Semakin curam kemiringan dan semakin besar debit air, semakin tinggi pula kecepatan aliran. Hambatan

seperti batu, vegetasi, dan sedimen dapat memperlambat aliran air dan menciptakan variasi dalam dinamika aliran sungai (John P. Miller, 1995).

8.2.3 Erosi dan Sedimentasi

Erosi dan sedimentasi adalah dua proses utama yang membentuk morfologi sungai. Erosi terjadi ketika aliran air mengikis material dari dasar dan tebing sungai, yang kemudian diangkut oleh aliran air (Knighton, 1998). Proses ini dapat menyebabkan perubahan bentuk sungai, seperti pembentukan meander atau perubahan kedalaman sungai (Schumm, 1977).

Sedimentasi terjadi ketika kecepatan aliran air menurun, sehingga partikel-partikel sedimen yang diangkut oleh aliran air mulai mengendap di dasar sungai. Proses ini penting dalam pembentukan fitur geomorfologis seperti delta, aluvial, dan bantaran sungai. Teknik-teknik pengendalian sedimentasi, seperti pembangunan bendungan dan penggunaan struktur penghalang, dapat membantu mengelola transportasi sedimen dan menjaga stabilitas sungai (Richards, 1982).

8.2.4 Perubahan Morfologi Sungai

Perubahan morfologi sungai dapat terjadi akibat proses alami maupun intervensi manusia. Proses alami seperti erosi, sedimentasi, dan perubahan iklim dapat mempengaruhi bentuk sungai dari waktu ke waktu. Intervensi manusia, seperti pembangunan infrastruktur dan perubahan penggunaan lahan, juga dapat mempercepat atau mengubah proses-proses tersebut (William E. Dietrich, 1983).

Pembentukan meander, delta, dan struktur aluvial lainnya adalah contoh perubahan morfologi yang dihasilkan dari interaksi antara aliran air dan sedimen. Studi tentang perubahan morfologi sungai penting untuk memahami bagaimana sungai bereaksi terhadap perubahan lingkungan dan aktivitas manusia, serta untuk merancang strategi pengelolaan yang efektif (Luna B. Leopold, 1995).

8.2.5 Studi Kasus Morfodinamik Sungai

Studi kasus morfodinamik sungai memberikan gambaran nyata tentang bagaimana proses-proses morfodinamik terjadi di lapangan sebagai berikut:

1. Analisis morfodinamik di Sungai Mississippi menunjukkan bagaimana pengelolaan sedimen dan pembangunan bendungan mempengaruhi morfologi sungai dan ekosistem di sekitarnya (Garcia, 2008).
2. Studi kasus di Sungai Amazon menunjukkan dinamika aliran yang sangat kompleks akibat debit air yang besar dan variasi topografi yang luas. Proses erosi dan sedimentasi di sungai ini memainkan peran penting dalam pembentukan delta dan lembah sungai yang luas, yang mempengaruhi habitat bagi berbagai spesies flora dan fauna (Parker, 2004).
3. Studi kasus Eksplorasi dinamika perubahan dasar dan tebing Sungai Jambu di sekitar Jembatan Cikuya, Cilacap, Jawa Tengah. Penelitian menggunakan model transportasi sedimen yang diintegrasikan dengan model stabilitas tebing ARS-USDA (Bank Stability and Toe Erosion Model) untuk memprediksi perubahan morfologi sungai selama 10 tahun. Hasil simulasi menunjukkan adanya pengendapan pada 17 penampang dan erosi pada 15 penampang, dengan pengendapan tertinggi terjadi di bawah Jembatan Cikuya. Prediksi juga menunjukkan bahwa keruntuhan tebing akan terjadi di 7 penampang akibat kemiringan tebing yang curam dan tekanan air tanah yang dipengaruhi oleh fluktuasi aliran dan efek pasang surut (H. Aulia, 2024).
4. analisis morfologi dasar Sungai Krasak di sekitar Sabo Dam KR-C0, Sleman, Yogyakarta. Sabo dam dibangun untuk mengendalikan aliran debris dari letusan Gunung Merapi, namun juga mempengaruhi morfologi dasar sungai. Simulasi menggunakan software iRIC Nays2DH menunjukkan bahwa penambahan sabo dam mengurangi proses agradasi dan degradasi pada dasar sungai, dengan pengurangan tinggi deposisi material sedimen yang terjadi. Hasil simulasi juga menunjukkan penurunan kecepatan aliran dari 10-12 m/s menjadi 6-9 m/s setelah adanya sabo dam (Nugroho, 2023).

5. Penelitian ini mengkaji kondisi hidraulika dan morfologi dasar Sungai Pabelan di sekitar Sabo Dam PAC-3, Pacitan, Jawa Timur. Simulasi menggunakan software iRIC Nays2DH menunjukkan bahwa penambahan sabo dam mengubah pola aliran dari memusat menjadi teratur, serta mengurangi kecepatan aliran dari 10-12 m/s menjadi 6-9 m/s. Proses agradasi dan degradasi pada dasar sungai juga berkurang signifikan dengan adanya sabo dam (Agus Hery Priyanto, 2023).

8.2.6 Teknologi dan Inovasi dalam Studi Morfodinamik

Perkembangan teknologi telah membawa inovasi dalam studi morfodinamik sungai. Penggunaan GIS dan remote sensing memungkinkan para peneliti untuk memetakan dan menganalisis perubahan morfologi sungai dengan presisi tinggi. Model numerik dan simulasi komputer juga digunakan untuk memprediksi dinamika aliran dan transportasi sedimen dalam berbagai skenario (Michael Church, 2012).

Inovasi ini tidak hanya membantu dalam penelitian tetapi juga dalam pengelolaan sungai. Misalnya, teknologi pemodelan dapat digunakan untuk merancang struktur pengendalian erosi yang lebih efisien atau untuk mengembangkan strategi mitigasi risiko banjir yang lebih efektif (Julien, 2002).

8.3 Faktor-faktor yang mempengaruhi sedimentasi

Sedimentasi adalah proses pengendapan partikel-partikel sedimen yang diangkut oleh aliran air. Proses ini dipengaruhi oleh berbagai faktor yang kompleks dan saling berinteraksi. Memahami faktor-faktor yang mempengaruhi sedimentasi sangat penting dalam perencanaan dan pengelolaan sungai, serta untuk mencegah masalah seperti pendangkalan sungai dan banjir.

1. Kecepatan Aliran Air: Kecepatan aliran air merupakan faktor utama yang mempengaruhi sedimentasi. Ketika kecepatan aliran air tinggi, partikel sedimen diangkut oleh aliran air. Sebaliknya, ketika kecepatan aliran menurun, partikel-partikel sedimen mulai mengendap di dasar sungai. Penurunan kecepatan aliran air dapat terjadi akibat perubahan kemiringan

- sungai, adanya hambatan seperti batuan besar, atau pembangunan struktur seperti bendungan (Garcia, 2008).
2. Karakteristik Sedimen: Ukuran, bentuk, dan densitas partikel sedimen juga mempengaruhi proses sedimentasi. Partikel yang lebih besar dan lebih berat cenderung mengendap lebih cepat dibandingkan dengan partikel yang lebih kecil dan lebih ringan. Selain itu, bentuk partikel juga mempengaruhi koefisien drag, yang pada gilirannya mempengaruhi kecepatan pengendapan (Knighton, 1998).
 3. Volume Air dan Debit Aliran: Volume air dan debit aliran sungai berperan penting dalam menentukan jumlah sedimen yang diangkut dan diendapkan. Pada musim hujan, debit aliran yang tinggi dapat mengangkut lebih banyak sedimen, sementara pada musim kemarau, debit aliran yang rendah cenderung mengakibatkan peningkatan proses pengendapan (Julien, 2002).
 4. Topografi dan Kemiringan Dasar Sungai: Topografi dan kemiringan dasar sungai mempengaruhi kecepatan aliran dan distribusi sedimen. Sungai dengan kemiringan yang curam cenderung memiliki aliran yang lebih cepat dan proses erosi yang lebih intens, sementara sungai dengan kemiringan landai cenderung mengalami proses sedimentasi yang lebih dominan (Luna B. Leopold, 1995).
 5. Vegetasi dan Penutup Lahan: Vegetasi di sepanjang tepi sungai dapat mempengaruhi proses sedimentasi dengan mengurangi kecepatan aliran dan meningkatkan stabilitas tebing sungai. Akar vegetasi membantu mengikat tanah dan mencegah erosi, serta memerangkap sedimen yang terbawa aliran air. Perubahan penutup lahan akibat aktivitas manusia seperti deforestasi dan urbanisasi dapat meningkatkan erosi dan mempercepat sedimentasi di sungai (Richards, 1982).
 6. Perubahan Iklim: Perubahan iklim dapat mempengaruhi pola curah hujan, debit aliran, dan suhu, yang semuanya berkontribusi terhadap perubahan proses sedimentasi. Curah hujan yang ekstrem dan banjir dapat meningkatkan erosi dan transportasi sedimen, sedangkan periode kekeringan dapat

memperlambat aliran air dan meningkatkan pengendapan sedimen (Schumm, 1977).

Memahami faktor-faktor ini memungkinkan para ilmuwan dan insinyur untuk merancang strategi yang efektif dalam mengelola sedimentasi dan menjaga keseimbangan ekosistem sungai. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengidentifikasi interaksi kompleks antara faktor-faktor ini dan dampaknya terhadap dinamika sungai.

8.4 Dampak sedimentasi terhadap lingkungan dan masyarakat

Sedimentasi adalah proses pengendapan partikel-partikel sedimen yang terbawa oleh aliran air di dasar sungai, danau, atau waduk. Proses ini memiliki dampak yang signifikan terhadap lingkungan dan masyarakat. Dalam konteks pengelolaan sumber daya air, memahami dampak sedimentasi sangat penting untuk merancang strategi mitigasi yang efektif.

1. **Dampak terhadap Kualitas Air:** Sedimentasi dapat mempengaruhi kualitas air dengan mengakibatkan peningkatan kekeruhan dan penurunan kandungan oksigen terlarut. Peningkatan kekeruhan air mengurangi penetrasi cahaya matahari, yang berdampak negatif pada fotosintesis organisme akuatik seperti fitoplankton dan tanaman air. Selain itu, partikel sedimen dapat membawa polutan seperti logam berat dan bahan kimia, yang kemudian terakumulasi di dasar perairan dan mencemari ekosistem (Garcia, 2008).
2. **Dampak terhadap Habitat Akutik:** Sedimentasi yang berlebihan dapat merusak habitat akuatik dengan menutupi dasar perairan yang menjadi tempat hidup berbagai organisme seperti ikan, moluska, dan invertebrata. Proses ini dapat menyebabkan penurunan keanekaragaman hayati dan mengganggu rantai makanan. Selain itu, endapan sedimen dapat menghalangi aliran air dan mengurangi kemampuan sungai untuk mendukung kehidupan akuatik (Knighton, 1998).
3. **Dampak terhadap Infrastruktur:** Sedimentasi yang terjadi di waduk, bendungan, dan saluran irigasi dapat mengurangi

kapasitas penampungan dan efisiensi infrastruktur tersebut. Endapan sedimen di waduk dapat mengurangi volume air yang tersedia untuk irigasi, pembangkit listrik tenaga air, dan penyediaan air bersih. Selain itu, sedimentasi di saluran irigasi dapat menghambat aliran air dan mengurangi distribusi air ke lahan pertanian (Julien, 2002).

4. Dampak terhadap Masyarakat: Dampak sedimentasi tidak hanya terbatas pada lingkungan, tetapi juga berdampak langsung terhadap masyarakat. Penurunan kualitas air dan kerusakan habitat akuatik dapat mengurangi ketersediaan sumber daya perikanan, yang merupakan sumber pendapatan bagi masyarakat yang bergantung pada sektor perikanan. Selain itu, kerusakan infrastruktur akibat sedimentasi dapat menyebabkan kerugian ekonomi yang signifikan, terutama dalam hal biaya pemeliharaan dan perbaikan (Luna B. Leopold, 1995).
5. Dampak terhadap Banjir: Sedimentasi yang berlebihan di sungai dapat mengurangi kapasitas aliran sungai dan meningkatkan risiko banjir. Endapan sedimen dapat menyebabkan penyempitan alur sungai, sehingga aliran air meluap ke daratan saat debit air meningkat. Banjir yang terjadi akibat sedimentasi dapat menyebabkan kerusakan pada permukiman, lahan pertanian, dan infrastruktur, serta mengancam keselamatan masyarakat (Richards, 1982).

Untuk mengatasi dampak negatif sedimentasi, diperlukan strategi mitigasi yang efektif. Beberapa langkah yang dapat diambil antara lain:

1. Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS): Melakukan reboisasi dan konservasi tanah di daerah aliran sungai untuk mengurangi erosi tanah dan transportasi sedimen ke sungai.
2. Penggunaan Struktur Pengendalian Sedimen: Membangun struktur pengendalian sedimen seperti bendungan penahan sedimen dan saluran pengendali sedimen untuk mengurangi laju sedimentasi.
3. Pemantauan dan Pemeliharaan Berkala: Melakukan pemantauan berkala terhadap kualitas air dan endapan

sedimen, serta melakukan pemeliharaan infrastruktur untuk mencegah kerusakan yang lebih parah.

8.5 Metode pengendalian sedimentasi

Pengendalian sedimentasi merupakan langkah penting dalam pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan. Sedimentasi yang tidak terkendali dapat menyebabkan berbagai masalah lingkungan dan ekonomi, seperti pendangkalan sungai, kerusakan infrastruktur, dan penurunan kualitas air. Oleh karena itu, berbagai metode pengendalian sedimentasi telah dikembangkan untuk mengatasi masalah ini. Berikut adalah beberapa metode yang sering digunakan dalam pengendalian sedimentasi.

1. Vegetasi Penahan Erosi: Vegetasi di sepanjang tepi sungai dan daerah aliran sungai (DAS) dapat membantu mengurangi erosi dan transportasi sedimen. Akar-akar tanaman mengikat tanah, sehingga mencegah partikel tanah terlepas dan terbawa oleh aliran air. Selain itu, vegetasi juga dapat memperlambat aliran air, mengurangi kekuatan erosi, dan meningkatkan infiltrasi air ke dalam tanah (Luna B. Leopold, 1995).
2. Penggunaan Struktur Pengendalian Sedimen: Struktur seperti bendungan penahan sedimen, tanggul, dan terasering digunakan untuk mengurangi laju sedimentasi di sungai. Bendungan penahan sedimen dibangun untuk menangkap dan menahan sedimen sebelum mencapai sungai utama. Tanggul digunakan untuk mengarahkan aliran air dan mengurangi kecepatan aliran, sementara terasering diterapkan di lahan miring untuk memperlambat aliran air dan mengurangi erosi (Garcia, 2008).
3. Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS): Pengelolaan DAS yang efektif melibatkan penerapan praktik konservasi tanah dan air di seluruh wilayah DAS. Langkah-langkah ini termasuk reboisasi, pembuatan kolam retensi, dan penggunaan lahan secara bijaksana. Reboisasi membantu mengurangi erosi tanah, kolam retensi berfungsi menahan limpasan air hujan dan mengurangi laju aliran, sementara pengelolaan penggunaan lahan mencegah degradasi tanah dan erosi (Julien, 2002).

4. Pengendalian Praktik Pertanian: Praktik pertanian yang baik dapat mengurangi erosi tanah dan transportasi sedimen. Teknik seperti penanaman strip (*strip cropping*), pertanian kontur (*contour farming*), dan pemulihan lahan gundul (*gully plugging*) dapat membantu mengurangi erosi tanah di lahan pertanian. Selain itu, penggunaan penutup tanah (*cover crops*) dapat meningkatkan stabilitas tanah dan mengurangi limpasan (Knighton, 1998).
5. Penggunaan Teknologi Modern: Teknologi modern seperti GIS (*Geographic Information System*) dan remote sensing dapat digunakan untuk memantau perubahan morfologi sungai dan distribusi sedimen. Data yang diperoleh dari teknologi ini dapat membantu dalam merencanakan dan mengimplementasikan strategi pengendalian sedimentasi yang lebih efektif. Selain itu, model numerik dan simulasi komputer dapat digunakan untuk memprediksi perilaku sedimen dan efektivitas berbagai metode pengendalian (André G. Roy, 2012).
6. Pemeliharaan dan Pemantauan Berkala: Pemeliharaan berkala terhadap struktur pengendalian sedimen dan pemantauan kondisi sungai sangat penting untuk memastikan efektivitas metode pengendalian yang diterapkan. Inspeksi rutin, pembersihan endapan sedimen, dan perbaikan struktur yang rusak adalah langkah-langkah yang perlu diambil untuk menjaga kinerja pengendalian sedimentasi (Schumm, 1977).

Pengendalian sedimentasi memerlukan pendekatan holistik yang melibatkan berbagai metode dan praktik konservasi. Kolaborasi antara pemerintah, masyarakat, dan pemangku kepentingan lainnya sangat penting untuk mencapai keberhasilan dalam pengelolaan sedimentasi dan pelestarian ekosistem sungai.

8.6 Studi kasus manajemen sedimen di berbagai belahan dunia

Manajemen sedimen adalah aspek penting dalam pengelolaan sumber daya air di berbagai belahan dunia. Praktik manajemen yang efektif dapat mengurangi dampak negatif sedimentasi, seperti pendangkalan sungai, kerusakan infrastruktur, dan penurunan

kualitas air. Berikut adalah beberapa studi kasus manajemen sedimen dari berbagai belahan dunia yang memberikan gambaran tentang tantangan dan solusi yang diterapkan di lapangan.

1. Waduk Aswan, Mesir

Waduk Aswan di Mesir merupakan salah satu proyek pengendalian sedimen terbesar di dunia. Dibangun di Sungai Nil, waduk ini berfungsi untuk mengontrol banjir, menyediakan air irigasi, dan menghasilkan listrik tenaga air. Namun, sedimentasi yang tinggi dari Sungai Nil menjadi tantangan besar. Untuk mengatasi masalah ini, teknik pengelolaan sedimen seperti pengelolaan DAS, penanaman vegetasi, dan pembuatan bendungan penahan sedimen di hulu sungai telah diterapkan. Selain itu, pengerukan rutin di waduk dilakukan untuk menjaga kapasitas penampungan air (White, 2008).

2. Sungai Yangtze, Tiongkok

Sungai Yangtze di Tiongkok mengalami tingkat sedimentasi yang tinggi akibat erosi tanah di daerah aliran sungai. Proyek Bendungan Tiga Ngarai (Three Gorges Dam) dibangun untuk mengatasi masalah ini dan mengontrol aliran sedimen. Manajemen sedimen di proyek ini melibatkan penggunaan struktur pengendali sedimen, penanaman vegetasi di sepanjang tepi sungai, dan pemantauan kualitas air secara berkala. Teknologi modern seperti GIS dan remote sensing digunakan untuk memantau perubahan morfologi sungai dan efektivitas metode pengendalian yang diterapkan (Qiang Zhang, 2009).

3. Waduk Tarbela, Pakistan

Waduk Tarbela di Pakistan adalah salah satu waduk terbesar di dunia yang mengalami masalah sedimentasi parah. Untuk mengelola sedimen, berbagai metode telah diterapkan, termasuk pembangunan bendungan penahan sedimen di hulu sungai, penggunaan terowongan pengelak untuk membuang sedimen, dan pengerukan di waduk. Selain itu, manajemen DAS dilakukan melalui reboisasi dan praktik konservasi tanah untuk mengurangi erosi dan transportasi sedimen (Khan, 2011).

4. Sungai Colorado, Amerika Serikat

Manajemen sedimen di Sungai Colorado menjadi perhatian utama di wilayah barat daya Amerika Serikat. Bendungan Hoover dan Glen Canyon dibangun untuk mengontrol aliran air dan sedimen. Namun, sedimentasi yang tinggi di bagian hulu sungai mempengaruhi kapasitas bendungan. Untuk mengatasi masalah ini, teknik pengelolaan sedimen seperti penggunaan struktur pengendali sedimen, vegetasi penahan erosi, dan teknologi pemantauan berbasis GIS diterapkan. Selain itu, pemulihan ekosistem sungai dilakukan dengan mengatur aliran air buatan untuk meniru kondisi alami sungai (John C. Schmidt, 2011).

5. Sungai Murray-Darling, Australia

Sungai Murray-Darling di Australia mengalami tantangan sedimentasi yang signifikan akibat aktivitas pertanian dan perubahan penggunaan lahan. Manajemen sedimen di sungai ini melibatkan penerapan praktik pertanian konservasi, pembangunan struktur pengendali sedimen, dan reboisasi di daerah aliran sungai. Pemantauan kualitas air dan endapan sedimen dilakukan secara berkala menggunakan teknologi remote sensing dan model numerik untuk memastikan efektivitas metode pengendalian yang diterapkan (Martin C. Thoms, 2007).

DAFTAR PUSTAKA

- Agus Hery Priyanto, N. P. H., 2023. Analisis Morfologi Dasar Sungai di Sekitar Bangunan Sabo Dam: Studi Kasus Kali Pabelan PAC-3 Menggunakan Software IRIC NAYS 2D. *Journal of Hydraulic Engineering*, 15(3), pp. 234-245.
- André G. Roy, M. C. P. M. B., 2012. *Gravel-Bed Rivers: Processes, Tools, Environments*. 1st ed penyunt. Wiley-Blackwell: Chichester.
- Garcia, M. H., 2008. *Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice*. 1st ed penyunt. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Garcia, M. H., 2008. *Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice*. 110 penyunt. Reston, Virginia, Amerika Serikat: American Society of Civil Engineers.
- H. Aulia, E. O. N., 2024. Dinamika Perubahan Dasar dan Tebing Sungai Jambu: Studi Kasus pada Sekitar Jembatan Cikuya. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 15(1), pp. 1-15.
- John C. Schmidt, P. E. G., 2011. The High Flows Experiment: Restoring Ecosystem Processes in the Colorado River. *Ecosystem Management Journal*, 12(3), pp. 45-56.
- John P. Miller, L. B. L. M. G. W., 1995. *Fluvial Processes in Geomorphology*. Reprint ed penyunt. New York: Dover Publications.
- John P. Miller, L. B. L. M. G. W., 1995. *Fluvial Processes in Geomorphology*. Reprint ed penyunt. New York: Dover Publications.
- Julien, P. Y., 2002. *River Mechanics*. 1st ed penyunt. Cambridge; New York: Cambridge University Press.
- Khan, M. A., 2011. Sediment Management in Tarbela Reservoir. *Water Resources Management*, 25(1), pp. 121-133.
- Knighton, D., 1998. *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*. 2nd ed penyunt. London: Edward Arnold.
- Knighton, D., 1998. *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*. Kedua penyunt. London: Arnold.

- Luna B. Leopold, J. P. M. M. G. W., 1995. *Fluvial Processes in Geomorphology*. Reprint ed penyunt. New York: Dover Publications.
- Martin C. Thoms, J. F. M. P., 2007. Sediment Management in the Murray-Darling Basin. *River Research and Applications*, 23(9), pp. 861-879.
- Michael Church, A. G. R. P. M. B., 2012. *Gravel-Bed Rivers: Processes, Tools, Environments*. 7 penyunt. Chichester, West Sussex, Inggris: Wiley-Blackwell.
- Nugroho, E. O., 2023. Analisis morfologi dasar Sungai Krasak di sekitar Sabo Dam KR-C0, Sleman, Yogyakarta. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 15(1), pp. 45-58.
- Parker, G., 2004. *1D Sediment Transport Morphodynamics with Applications to Rivers and Turbidity Currents*. E-book penyunt. E-book: Community Surface Dynamics Modeling System (CSDMS).
- Qiang Zhang, X. W. Z. L., 2009. Sediment Management in the Three Gorges Dam Project. *Journal of Environmental Management*, 90(S3), pp. S268-S273.
- Richards, K. S., 1982. *Rivers: Form and Process in Alluvial Channels*. 1st ed penyunt. Richards: Methuen.
- Schumm, S. A., 1977. *The Fluvial System*. 1st ed penyunt. New York: Wiley-Interscience.
- Schumm, S. A., 1977. *The Fluvial System*. 1st ed penyunt. New York: Wiley-Interscience.
- Simon, A., 2006. *Processes and Forms of Channel Adjustment*. 1st ed penyunt. Amsterdam: Elsevier.
- Thorne, C., 1990. *Effects of Sediment Transport on River Morphodynamics*. I penyunt. Chichester, Inggris: John Wiley & Sons.
- UNESCO, 2017. *Sediment Problems and Strategies for Their Management: Experience from Several Large River Basins*. I penyunt. Paris: UNESCO.
- Walling, D., 2009. *Sediment Problems and Strategies for Their Management: Experience from Several Large River Basins*. I penyunt. Paris: UNESCO.

- White, W. R., 2008. Sediment Management Options for the Aswan High Dam. *International Journal of Sediment Research*, 23(2), pp. 147-154.
- William E. Dietrich, J. D. S., 1983. Influence of the Point Bar on Flow Through Curved Channels. *Water Resources Research*, 19(5), pp. 1173-1192.
- Yayuk Apriyanti, R. H., 2016. Studi Karakteristik Sedimen Dan Laju Sedimentasi. *Fropil*, pp. 165-174.

BIODATA PENULIS



Dr. Amrullah Mansida, ST., M.T., Asean Eng.

Dosen Pascasarjana Magister Teknik Sumber Daya Air
Universitas Muhammadiyah Makassar

Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Pengairan Fakultas Teknik dan Pascasarjana Magister Teknik Sumber Daya Air Universitas Muhammadiyah Makassar. Menyelesaikan pendidikan S₁ pada program Studi Teknik pengairan Unismuh Makassar, melanjutkan S₂ dan menyelesaikan S₃ program Studi Teknik Sipil di Universitas Hasanuddin. Penulis menekuni bidang Menulis Teknik sipil, Teknik Sungai, Morfologi Sungai, Drainase Perkotaan, Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Pengembangan Sumber Daya Air, Insinyur Indonesia, Sistem manajemen K3, Manajemen Risiko; Teori, Kasus, dan Solusi serta Etika Profesi Teknik, Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja, metode penelitian dan pengembangannya, dan Manajemen Teknik: Panduan Praktis untuk Keberhasilan Dalam proyek Teknik, Konservasi Tanah dan Air, Teknik Sungai berkelanjutan, Drainase Perkotaan Berkelanjutan dan Hidrologi.

Pengalaman penulis sebagai mengajar matakuliah Hidrologi Teknik I, Hidrologi Teknik II, Marfologi Sungai, Teknik Sungai, Pengembangan Sumber Daya Air, Perencanaan dan pengelolaan Waduk, Etika Profesi, dan Standar Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3), Hidrologi Terapan Lanjut, Teknik Sungai berkelanjutan (Hidrodinamika Sungai) dan Hidrometeorologi (Mitigasi Bencana), sekarang. Selain menjadi akademisi di kampus penulis juga sebagai

praktisi dengan pengabdian dalam berpartisipasi membangun bangsa melalui keterlibatan sebagai konsultan perencanaan, pengawasan bidang pengembangan sumber daya air dan menjadi asesor sertifikat SKA Asosiasi serta asesor BKD.

BIODATA PENULIS



Dr. Azizah Rokhmawati, ST, MT.
Dosen Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Islam Malang

Penulis lahir di Malang pada 9 Mei 1972. Saat ini, menjadi dosen tetap di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Malang. Gelar Sarjana Teknik (S.T.) diperoleh pada tahun 2008 dari Jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Malang. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan Magister Teknik (M.T.) di Program Pascasarjana Teknik Sipil, Universitas Brawijaya, dengan minat khusus pada sumberdaya air. Gelar Doktor (Dr.) diraih pada tahun 2021 dari Program Doktor Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang.

Di samping berprofesi sebagai dosen, penulis saat ini terdaftar sebagai pengurus FORDAS (Forum DAS) Jawa Timur dalam bidang sumber daya air. Penulis juga aktif menghadiri seminar ilmiah dan menulis di jurnal serta prosiding, baik skala nasional maupun internasional. Topik penelitian yang menjadi fokus penulis antara lain adalah masalah drainase perkotaan, sumur resapan, sedimen transport dan teknik pengelolaan sungai.

BIODATA PENULIS



Farida Gaffar. ST.,MM.

Dose Program Stud Teknik Pengairan
Fakultas Teknik Univesitas Muhammadiyah Makassar

Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Pengairan Universitas Muhammadiyah Makassar.

Menyelesaikan pendidikan S1 pada program Studi Teknik Pengairan Universitas Muhammadiyah Makassar, melanjutkan S2 pada Universitas Muslim Indonesia.

Penulis menekuni bidang menulis Teknik Sipil.

Pengalaman penulis sebagai pengajar mata kuliah Mekanika Fluida, Hidrolika, Teknik Sungai, Pengolahan Kualitas dan Jaringan Perpipaa, Pengembangan Sumber Daya Air, Irigasi. Selain menjadi akademisi saat ini penulis juga melakukan pengabdian dan berpartisipasi membangun bangsa melalui keterlibatan sebagai konsultan pengawasan dibidang sumber daya air.

BIODATA PENULIS



Ady Purnama, S.T., M.Eng.
Dosen Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Samawa

Penulis lahir di Sumbawa tanggal 2 September 1984. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Samawa. Lulus pendidikan S-1 pada Jurusan Teknik Sipil & Lingkungan UGM (2010). Lulus pendidikan S-2 pada Jurusan Teknik Sipil & Lingkungan UGM (2014), dan sedang melanjutkan S3 pada Jurusan Doktor Manajemen Rekayasa (DMR).

Ringkasan Kualifikasi:

- Ahli Utama di Bidang Keahlian Teknik Sumber Daya Air
- Ahli Utama di Bidang Keahlian Teknik Bangunan Gedung
- Praktisi dibidang Teknik Sipil seperti Teknik Sumber Daya Air, Manajemen Konstruksi, Teknik Bangunan Gedung, Jalan.

Organisasi:

- Tim Penilai Ahli Bangunan Gedung Kabupaten Sumbawa
- Instruktur & Asesor Badan Nasional Sertifikasi Profesi (BNSP)

ID:

- SINTA ID : 6137972
- E-mail : adypurnama48@gmail.com
- <https://sinta.kemdikbud.go.id/authors/profile/6137972>
- <https://scholar.google.com/citations?user=0kooxfAAAAAJ&hl=id&oi=ao>

BIODATA PENULIS



Ganisa Elsina Salamena S.T., M.T.
Dosen tetap di Politeknik Negeri Ambon

Ganisa Elsina Salamena S.T., M.T. Lahir di Kota Ambon, pada tanggal 13 Juni 1996. Menyelesaikan S1 Jurusan Teknik Pengairan Universitas Brawijaya tahun 2017, dan S2 di Program Magister Pengelolaan Sumber Daya Air Institut Teknologi Bandung 2021. Kegiatan sekarang adalah melakukan pengajaran, penelitian maupun pengabdian di bidang konstruksi sipil-sumber daya air dan aktif sebagai dosen tetap di Politeknik Negeri Ambon.

BIODATA PENULIS



Dr. Ir. Imam Rohani, ST., MT
Dosen Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik, Universitas Sulawesi Barat

Penulis lahir di Luwu, tanggal 1 Juli 1981. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sulawesi Barat. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik sipil universitas Tadulako dan melanjutkan S2 & S3 pada Jurusan Teknik sipil universitas Hasanuddin. Karya Buku yang telah diterbitkan antara lain: Mekanika Fluida Untuk Bidang Ilmu Rekayasa, Aliran Eksternal dan Mekanika Fluida Untuk Bidang Ilmu Rekayasa Lanjut.

BIODATA PENULIS



Mahmuddin, S.T., M.T.

Dosen Program Studi Teknik Pengairan
Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar

Penulis lahir di Bantaeng tanggal 17 Desember 1968. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Pengairan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Sipil dan melanjutkan S2 pada Jurusan Teknik Sipil. Penulis menekuni bidang Menulis di bidang pengairan diantaranya: perencanaan bendung, perencanaan saluran irigasi, analisis hidrologi perencanaan jembatan, perencanaan drainase GKN Kota Makassar. Untuk mewujudkan karir sebagai dosen profesional, penulis pun aktif sebagai peneliti dibidang kepakaran tersebut. Beberapa penelitian telah dipublikasikan baik jurnal nasional maupun internasional. Penelitian yang telah dipublikasikan tersebut ada yang didanai oleh internal perguruan tinggi dan ada juga oleh Kemenristek DIKTI. Selain itu juga aktif dalam pengabdian pada masyarakat menerapkan kepakaran dalam bidang pengairan, diantaranya: Ibm Pompa Hidram di Soppeng, Ibm Pompa Solar sell di Bissoloro, meberdayakan tenaga pada pembangunan drainase kantor GKN Makassar maupun lainnya. Telah menghasilkan karya tulis dalam bentuk buku kolaborasi: Geotekniknis Tanah, Bangunan Air, Pemadatan Tanah dan Buku Bahan Ajar lainnya.