

ESTIMASI BIAYA REMEDIASI EKOSISTEM MANGROVE TERCEMAR HIDROKARBON: STUDI KASUS TAHURA NGURAH RAI, TELUK BENOA

*Cost Estimation For The Remediation Of Hydrocarbon-Contaminated
Mangrove Ecosystems: A Case Study Of Ngurah Rai Grand Forest Park
(Tahura), Benoa Bay*

Wayan Hari Premananda

Universitas Udayana

Email: wayanhari@unud.ac.id

Abstract

The mangrove ecosystem within the Ngurah Rai Grand Forest Park (Tahura) in Benoa Bay experienced vegetation dieback and degradation across an area of 3,800 m², triggered in part by hydrocarbon contamination resulting from a fuel oil (biosolar) seepage from a pipeline near the Bali Mandara Toll Road exit. This study aims to determine the quantity and volume of recovery requirements based on the condition of the affected area, develop a cost estimate for each stage of mangrove ecosystem recovery by applying the remediation cost concept—defined as the cost required to restore contaminated environmental conditions to an established standard—and analyze the cost component that contributes most significantly to the total recovery cost. A descriptive quantitative approach was used, decomposing recovery activities into five cost component groups: preparation and supporting facilities, soil and land handling, bioremediation, revegetation—maintenance—monitoring, and temporary storage site (TPS) operations. The recovery area was set at 3,800 m² based on measurements by the National Land Agency, with an assumed excavation depth of 0.8 m, yielding an affected material volume of 3,040 m³. The results indicate a total estimated recovery cost of IDR 23,158,025,000, with preparation and supporting facilities—particularly the acquisition of an 800 m² TPS site—identified as the largest cost contributor. These findings suggest that decisions regarding TPS location and land ownership status significantly influence total recovery costs, and should therefore be a primary consideration in budget planning for the recovery of hydrocarbon-contaminated coastal ecosystems.

Keywords: Environmental Cost Estimation; Mangrove ecosystem; Hydrocarbon Contamination; Remediation

Abstrak

Ekosistem mangrove pada kawasan Taman Hutan Raya (Tahura) Ngurah Rai di Teluk Benoa mengalami kematian dan degradasi vegetasi pada area seluas 3.800 m² yang dipicu antara lain oleh pencemaran hidrokarbon akibat rembesan bahan bakar minyak jenis biosolar dari jalur pipa di dekat exit Tol Bali Mandara. Penelitian ini bertujuan menentukan kuantitas dan volume kebutuhan pemulihan berdasarkan kondisi area terdampak, menyusun estimasi biaya untuk setiap tahapan pemulihan ekosistem mangrove dengan menerapkan konsep remediation cost yaitu biaya yang diperlukan untuk memulihkan kondisi lingkungan tercemar hingga mencapai standar yang ditetapkan serta menganalisis komponen biaya yang memberikan kontribusi paling signifikan terhadap total biaya pemulihan. Metode yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif deskriptif, dengan menguraikan kegiatan pemulihan menjadi lima kelompok

komponen biaya: persiapan dan fasilitas pendukung, penanganan tanah dan lahan, bioremediasi, revegetasi–pemeliharaan–monitoring, serta operasional tempat penyimpanan sementara (TPS). Luas area pemulihan ditetapkan sebesar 3.800 m² berdasarkan hasil pengukuran Badan Pertanahan Nasional, dengan asumsi kedalaman pengerukan substrat 0,8 m sehingga diperoleh volume material terdampak sebesar 3.040 m³. Hasil perhitungan menunjukkan total estimasi biaya pemulihan sebesar Rp23.158.025.000, dengan komponen persiapan dan fasilitas pendukung terutama pengadaan lahan TPS seluas 800 m² sebagai kontributor biaya terbesar. Temuan ini mengindikasikan bahwa keputusan mengenai lokasi dan status kepemilikan lahan TPS berpengaruh signifikan terhadap total biaya pemulihan, sehingga perlu menjadi pertimbangan utama dalam perencanaan anggaran pemulihan ekosistem pesisir yang tercemar hidrokarbon.

Kata Kunci: Biaya Estimasi Lingkungan; Ekosistem Mangrove; Pencemaran Hidrokarbon; Remediasi

PENDAHULUAN

Ekosistem mangrove termasuk salah satu ekosistem pesisir yang berperan penting dalam menjaga keseimbangan lingkungan dan mendukung berbagai proses ekologis, baik sebagai pelindung kawasan pesisir dari abrasi dan energi gelombang, habitat berbagai biota, daerah pemijahan dan pembesaran biota perairan, maupun sebagai penyerap dan penyimpan karbon (*blue carbon*) (Barbier *et al.*, 2011). Taman Hutan Raya (Tahura) Ngurah Rai di kawasan Teluk Benoa merupakan salah satu kawasan mangrove di Provinsi Bali yang memiliki nilai ekologis strategis, yang berfungsi sebagai zona penyangga antara daratan dan perairan pesisir di wilayah Kota Denpasar dan Kabupaten Badung (Andika *et al.*, 2019).

Pada sebagian kawasan Mangrove Tahura Ngurah Rai di area Teluk Benoa, khususnya pada bagian yang berdekatan dengan Jalan Tol Bali Mandara, telah terjadi fenomena kematian vegetasi mangrove secara bersamaan dalam waktu yang relatif singkat. Berdasarkan informasi kejadian kedaruratan, pada tanggal 23 September 2025 ditemukan rembesan bahan bakar minyak (BBM) jenis biosolar pada area di bawah exit Tol Bali Mandara, dengan estimasi volume tumpahan mencapai 1.252,1 liter. Penanganan awal dilakukan melalui pemasangan *clamp* pada pipa dan pembersihan area menggunakan oil sorbent. Hasil investigasi lapangan pada area terdampak menemukan indikasi keberadaan hidrokarbon pada substrat mangrove, yang dikonfirmasi melalui identifikasi aroma minyak pada 15 titik pengamatan, *surface oil film* pada kedalaman 5–30 cm, dark hydrocarbon staining pada empat titik pengamatan, serta hasil analisis Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) yang mengidentifikasi 41 senyawa hidrokarbon pada sampel sedimen, sebagian besar merupakan senyawa yang lazim ditemukan pada bahan bakar seperti gasoline, kerosene, dan diesel.

Kondisi tersebut sejalan dengan hasil pemetaan vegetasi menggunakan analisis *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), yang menunjukkan penurunan kondisi signifikan dari kisaran 0,56–0,87 (kondisi sehat hingga sangat sehat) pada Juli 2024 menjadi 0,23–0,77 (kondisi stres hingga terdegradasi) pada Desember 2025. Delineasi berbasis citra drone mengidentifikasi luas indikatif area mangrove terpapar sebesar 3.328,69 m², sementara hasil pengukuran oleh Badan Pertanahan Nasional (BPN) menetapkan luas lahan yang mengalami kerusakan

sebesar 3.800 m². Perbedaan tersebut mencerminkan perbedaan pendekatan dan sumber data antara metode delineasi spasial berbasis interpretasi citra dengan metode pengukuran kadaster, sehingga diperlukan penetapan satu luas acuan yang konsisten untuk kepentingan perencanaan pemulihan.

Kematian dan degradasi vegetasi mangrove diduga dipicu oleh pencemaran hidrokarbon akibat rembesan bahan bakar minyak dari jalur pipa yang berada di sekitar lokasi kejadian. Penelitian Akbar *et al.* (2026) mengenai dampak tumpahan minyak terhadap ekosistem mangrove di Jawa Barat juga menunjukkan hasil yang serupa, yaitu bahwa pencemaran hidrokarbon dapat menyebabkan degradasi kondisi vegetasi mangrove. Meskipun demikian, beberapa kajian teknis terdahulu juga mengidentifikasi adanya kemungkinan pengaruh faktor lingkungan lain, seperti genangan, perubahan kualitas substrat, dan gangguan hidrologi, yang dapat memperburuk kondisi ekosistem mangrove. Menurut Velati *et al.* (2024), karakteristik substrat mangrove yang didominasi oleh sedimen halus, lumpur, dan bahan organik memungkinkan residu hidrokarbon tertahan pada permukaan lumpur, sistem perakaran, serta cekungan mikro yang dipengaruhi oleh pasang surut. Kondisi tersebut berpotensi memperpanjang keberadaan hidrokarbon di lingkungan mangrove sehingga memberikan tekanan yang berkelanjutan terhadap proses fisiologis, pertumbuhan, dan kelangsungan hidup vegetasi mangrove (Gundlach *et al.*, 2021). Kewajiban pemulihan fungsi lingkungan hidup akibat pencemaran memiliki dasar hukum dalam Ketentuan mengenai kewajiban pemulihan lingkungan hidup diatur dalam Undang Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Pasal 54 ayat (1) menyatakan bahwa setiap pihak yang menyebabkan pencemaran dan atau kerusakan lingkungan hidup wajib melakukan pemulihan fungsi lingkungan melalui penghentian sumber pencemaran, pembersihan unsur pencemar, remediasi, rehabilitasi, dan atau restorasi. Dengan demikian, kegiatan pemulihan tidak dapat direduksi hanya pada penanaman kembali vegetasi mangrove, melainkan mencakup rangkaian tindakan pada media lingkungan dan vegetasi secara terintegrasi.

Pelaksanaan rangkaian pemulihan tersebut membutuhkan sumber daya dan pembiayaan yang signifikan. Besarnya biaya pemulihan dipengaruhi oleh berbagai aspek, seperti tingkat dan luas area yang terdampak, kedalaman serta volume substrat yang memerlukan penanganan, metode pemulihan yang dipilih, baik secara *in situ*, *ex situ*, maupun kombinasi keduanya, kebutuhan tenaga kerja dan peralatan, pengelolaan material yang terkontaminasi, pelaksanaan bioremediasi, kegiatan revegetasi, serta durasi pemeliharaan dan monitoring setelah pemulihan dilakukan. Dalam konteks ekonomi lingkungan, kebutuhan biaya tersebut dapat didekati melalui konsep remediation cost, yang oleh Appraisal Institute (2013) didefinisikan sebagai biaya yang diperlukan untuk membersihkan atau memulihkan kondisi lingkungan yang mengalami kontaminasi hingga mencapai standar yang sesuai, mencakup baik penanganan kontaminasi pada lokasi maupun pengendalian dampak yang berpotensi menyebar ke luar lokasi.

Sampai saat ini, kebutuhan biaya pemulihan pada kasus pencemaran hidrokarbon di ekosistem mangrove khususnya pada konteks Indonesia—belum banyak diformulasikan secara sistematis dan terstruktur berdasarkan tahapan

kegiatan teknis di lapangan. Sebagian besar kajian rehabilitasi mangrove yang telah dipublikasikan cenderung berfokus pada aspek ekologis dan keberhasilan revegetasi (Primavera & Esteban, 2008; Bosire *et al.*, 2008), sementara pembahasan mengenai struktur dan besaran biaya pemulihan lingkungan pesisir yang tercemar hidrokarbon relatif terbatas. Kondisi ini mendorong perlunya kajian yang secara khusus menyusun estimasi biaya pemulihan berdasarkan tahapan kegiatan teknis, mulai dari persiapan, penanganan tanah dan substrat, bioremediasi, revegetasi, hingga pemeliharaan dan monitoring, sebagai dasar perencanaan dan penganggaran yang dapat dipertanggungjawabkan.

METODE

Fenomena yang menjadi objek dan fokus pokok dalam penelitian ini adalah kebutuhan penyusunan estimasi biaya pemulihan pada ekosistem Mangrove Tahura Ngurah Rai di area Teluk Benoa, yang mengalami kematian dan degradasi vegetasi pada area seluas 3.800 m² akibat pencemaran hidrokarbon dari rembesan bahan bakar minyak. Permasalahan yang dijumpai di lapangan adalah adanya kompleksitas kondisi area terdampak mencakup variasi tingkat kontaminasi substrat, kondisi vegetasi yang tidak seragam antara mangrove mati, mangrove hidup, dan regenerasi alami, serta keterbatasan akses akibat karakter kawasan intertidal yang dipengaruhi pasang surut. Kompleksitas tersebut menyebabkan kebutuhan pemulihan tidak dapat dihitung melalui pendekatan sederhana berupa perkalian luas area dengan satu harga pemulihan per meter persegi, melainkan memerlukan penguraian sistematis ke dalam tahapan kegiatan dan komponen biaya yang dapat ditelusuri. Kondisi ini mengindikasikan perlunya kajian yang mampu menerjemahkan data teknis kondisi lapangan menjadi estimasi biaya pemulihan yang terstruktur, sebagai dasar perencanaan dan penganggaran sebagaimana diamanatkan dalam ketentuan pemulihan fungsi lingkungan hidup (Undang-undang Republik Indonesia, 2009).

Penelitian ini menerapkan pendekatan kuantitatif dengan tipe deskriptif, karena bertujuan untuk mendeskripsikan secara rinci kondisi area terdampak serta menghitung kuantitas, volume, dan estimasi biaya pada setiap tahapan kegiatan pemulihan berdasarkan data teknis yang tersedia. Pendekatan ini dipilih karena kebutuhan penelitian bersifat menerjemahkan kondisi lapangan yang kompleks meliputi kondisi vegetasi, tanah dan substrat, serta luasan area—menjadi kuantitas pekerjaan yang terukur, yang selanjutnya dikonversi menjadi nilai biaya melalui penerapan konsep remediation cost (Appraisal Institute, 2013). Penelitian ini memanfaatkan dua jenis data, yaitu data primer dan data sekunder, dengan data sekunder menjadi sumber utama mengingat karakter penelitian yang bersifat analisis dan reanalisis terhadap dokumen teknis kajian terdahulu.

Sumber data dalam penelitian ini terbagi menjadi dua, yaitu sumber data primer dan sekunder. Sumber data primer diperoleh melalui penelaahan langsung terhadap dokumen Laporan Estimasi Perhitungan Biaya Pemulihan Ekosistem Mangrove beserta seluruh data teknis pendukung di dalamnya, yang mencakup hasil pengukuran luas area oleh Badan Pertanahan Nasional (BPN), hasil delineasi citra udara/drone, hasil analisis *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), hasil pengamatan lapangan terhadap kondisi substrat, serta hasil pengujian

laboratorium *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) pada sampel sedimen. Sementara itu, sumber data sekunder berasal dari Rancangan Teknis Pelaksanaan Pembersihan Area Terpapar Hidrokarbon, peraturan perundang-undangan terkait perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup, serta literatur akademik mengenai konsep biaya remediasi lingkungan dan rehabilitasi ekosistem mangrove. Penggunaan berbagai sumber data tersebut dimaksudkan untuk memperoleh dasar perhitungan yang komprehensif dan memperkuat validitas kuantitas serta estimasi biaya yang dihasilkan, sekaligus menjaga keterlacakan setiap asumsi teknis terhadap data dan kondisi aktual area kajian.

Teknik analisis data dilakukan melalui tahapan penguraian kegiatan pemulihan ke dalam lima kelompok komponen biaya persiapan dan fasilitas pendukung, penanganan tanah dan lahan, bioremediasi, revegetasi–pemeliharaan–monitoring, serta operasional tempat penyimpanan sementara (TPS) yang masing-masing diturunkan menjadi kuantitas pekerjaan terukur berdasarkan parameter luas, volume, jumlah unit, atau durasi kegiatan. Kuantitas tersebut selanjutnya dikalikan dengan harga satuan yang bersumber dari data harga pada dokumen kajian untuk memperoleh estimasi biaya setiap komponen, yang kemudian direkapitulasi untuk memperoleh total estimasi biaya pemulihan secara keseluruhan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelaahan terhadap dokumen kajian menunjukkan bahwa area Mangrove Tahura Ngurah Rai di Teluk Benoa yang berdekatan dengan Jalan Tol Bali Mandara mengalami perubahan kondisi vegetasi yang cukup signifikan dalam kurun waktu Juli 2024 hingga Desember 2025. Hasil analisis Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) menunjukkan penurunan nilai indeks dari kisaran 0,56–0,87 pada Juli 2024, yang mengindikasikan kondisi vegetasi sehat hingga sangat sehat, menjadi 0,23–0,77 pada Desember 2025, yang mengindikasikan kondisi stres hingga terdegradasi. Penurunan tersebut sejalan dengan temuan visual berupa gejala klorosis, nekrosis, dan pembusukan sistem perakaran pada sebagian vegetasi mangrove.

Pada aspek substrat, hasil pengamatan lapangan pada 15 titik yang dikategorikan terpapar menunjukkan teridentifikasinya aroma minyak, dengan surface oil film ditemukan pada kedalaman 5–30 cm dan dark hydrocarbon staining pada empat titik pengamatan. Hasil pengujian *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) pada sampel sedimen mengonfirmasi keberadaan 41 senyawa hidrokarbon, yang sebagian besar merupakan senyawa yang lazim ditemukan pada bahan bakar seperti gasoline, kerosene, dan diesel. Temuan ini memperkuat dasar bahwa kematian dan degradasi vegetasi pada area kajian dipicu antara lain oleh pencemaran hidrokarbon, sekalipun kondisi substrat tidak seragam pada seluruh area sehingga penanganan perlu dilakukan secara selektif.



Gambar 1. Peta Sebaran Kondisi Vegetasi Mangrove Berdasarkan Hasil Pemetaan Drone

Sumber: Hasil Kajian Analisis Fenomena Kematian Mangrove, 2026

Tabel 1. Hasil Pengamatan Kondisi Substrat

Aspek Pengamatan	Hasil
Kedalaman investigasi	Hingga 60 cm
Aroma minyak	Teridentifikasi pada 15 titik kategori terpapar
Surface oil film	Ditemukan pada kedalaman sekitar 5 sampai 30 cm
Dark hydrocarbon staining	Ditemukan pada 4 titik pengamatan
Metode verifikasi	Pengamatan lapangan dan analisis laboratorium

Penelitian ini menggunakan luas 3.800 m² sebagai acuan utama perhitungan, sebagaimana ditetapkan berdasarkan hasil pengukuran Badan Pertanahan Nasional (BPN). Nilai ini berbeda dengan luas hasil delineasi citra udara/drone pada kajian terdahulu sebesar 3.328,69 m², dengan selisih sebesar 471,31 m². Perbedaan tersebut mencerminkan perbedaan pendekatan pengukuran yaitu delineasi drone menggambarkan kondisi tajuk vegetasi berdasarkan interpretasi citra, sedangkan pengukuran BPN menggambarkan batas kadaster lahan yang mengalami kerusakan. Pemilihan luas 3.800 m² sebagai acuan tunggal dalam penelitian ini penting untuk menjaga konsistensi seluruh perhitungan kuantitas dan biaya, meskipun tidak seluruh luasan tersebut diasumsikan menerima intensitas penanganan yang seragam.

Tabel 2. Perbandingan Data Luas Area

Sumber Data	Luas	Keterangan
Delineasi kajian terdahulu	3.328,69 m ²	Hasil interpretasi dan delineasi berdasarkan citra udara/drone
Hasil pengukuran BPN	3.800 m ²	Hasil pengukuran lahan yang mengalami kerusakan
Luas yang digunakan	3.800 m ²	Ditetapkan sebagai luas area kajian dan

dalam kajian ini		dasar perhitungan estimasi biaya
------------------	--	----------------------------------

Berdasarkan luas acuan 3.800 m² dan asumsi kedalaman pengerukan substrat sebesar 0,8 m, diperoleh volume material terdampak yang menjadi dasar perhitungan sebesar 3.040 m³ (3.800 m² × 0,8 m). Volume tersebut selanjutnya menjadi dasar penentuan kebutuhan alat berat untuk pengerukan, jumlah ritasi kendaraan pengangkut menuju tempat penyimpanan sementara (TPS), serta kebutuhan volume media pengganti untuk pengisian kembali area bekas penanganan.

Pada komponen fasilitas pendukung, kebutuhan lahan TPS ditetapkan sebesar 800 m², dengan tiga alternatif lokasi yang teridentifikasi pada jarak indikatif 1,71–1,93 km dari area rehabilitasi. Pada komponen revegetasi, dengan jarak tanam 1,5 m × 1,5 m, diperoleh kebutuhan dasar sebanyak 1.689 batang bibit mangrove pada luas kajian penuh, meskipun jumlah aktual penanaman perlu disesuaikan dengan keberadaan vegetasi hidup dan regenerasi alami yang tetap dipertahankan. Kegiatan pemeliharaan dan monitoring direncanakan berlangsung setiap tiga bulan selama tiga tahun, atau sebanyak 12 periode monitoring.



Gambar 2. Alternatif Lokasi TPS terhadap Area Kajian

Hasil perhitungan menunjukkan total estimasi biaya pemulihan ekosistem mangrove sebesar Rp23.158.025.000. Rekapitulasi biaya per kelompok pekerjaan menunjukkan bahwa komponen persiapan dan fasilitas pendukung merupakan kontributor biaya terbesar, yaitu Rp18.277.500.000 atau setara 78,9% dari total estimasi biaya. Kelompok ini diikuti oleh operasional TPS sebesar Rp2.000.000.000 (8,6%), penanganan tanah dan lahan sebesar Rp1.305.800.000 (5,6%), bioremediasi sebesar Rp857.500.000 (3,7%), serta revegetasi, pemeliharaan, dan monitoring sebesar Rp717.225.000 (3,1%).

Dominasi komponen persiapan dan fasilitas pendukung terutama disebabkan oleh kebutuhan pengadaan lahan TPS seluas 800 m² dengan asumsi harga Rp20.000.000/m², yang menghasilkan biaya sebesar Rp16.000.000.000. Nilai tersebut setara dengan 69,1% dari total estimasi biaya pemulihan secara

keseluruhan, atau 87,5% dari total biaya pada kelompok persiapan dan fasilitas pendukung. Dengan kata lain, lebih dari dua pertiga total biaya pemulihan ekosistem mangrove pada kajian ini berasal dari satu komponen tunggal, yaitu pengadaan lahan untuk fasilitas penyimpanan sementara.

Tabel 3. Rekapitulasi Estimasi Biaya Pemulihan Ekosistem Mangrove

No.	Kelompok Pekerjaan	Estimasi Biaya
1	Persiapan dan Fasilitas Pendukung	Rp18.277.500.000
2	Penanganan Tanah dan Lahan	Rp1.305.800.000
3	Bioremediasi	Rp857.500.000
4	Revegetasi, Pemeliharaan, dan Monitoring	Rp717.225.000
5	Operasional TPS	Rp2.000.000.000
	Total Estimasi Biaya	Rp23.158.025.000

Temuan bahwa pengadaan lahan TPS menjadi komponen biaya paling dominan memiliki beberapa implikasi penting. Pertama, besaran biaya pemulihan ekosistem mangrove pada kasus ini tidak semata-mata mencerminkan kompleksitas teknis penanganan pencemaran hidrokarbon di lokasi terdampak, melainkan sangat dipengaruhi oleh keputusan non-teknis terkait lokasi dan status kepemilikan lahan pendukung di luar area rehabilitasi. Kedua, apabila lokasi TPS dapat memanfaatkan lahan yang telah tersedia atau menggunakan skema pemanfaatan lahan tanpa pengadaan baru misalnya melalui kerja sama pemanfaatan lahan milik pihak lain atau lahan pemerintah total estimasi biaya pemulihan berpotensi menurun secara signifikan, dari Rp23.158.025.000 menjadi sekitar Rp7.158.025.000 apabila komponen pengadaan lahan seluruhnya dikecualikan.

Temuan bahwa pengadaan lahan TPS menjadi komponen biaya paling dominan memiliki beberapa implikasi penting. Pertama, besaran biaya pemulihan ekosistem mangrove pada kasus ini tidak semata-mata mencerminkan kompleksitas teknis penanganan pencemaran hidrokarbon di lokasi terdampak, melainkan sangat dipengaruhi oleh keputusan non-teknis terkait lokasi dan status kepemilikan lahan pendukung di luar area rehabilitasi. Kedua, apabila lokasi TPS dapat memanfaatkan lahan yang telah tersedia atau menggunakan skema pemanfaatan lahan tanpa pengadaan baru misalnya melalui kerja sama pemanfaatan lahan milik pihak lain atau lahan pemerintah total estimasi biaya pemulihan berpotensi menurun secara signifikan, dari Rp23.158.025.000 menjadi sekitar Rp7.158.025.000 apabila komponen pengadaan lahan seluruhnya dikecualikan.

Sebagai perbandingan, komponen yang berkaitan langsung dengan penanganan pencemaran di lokasi terdampak yaitu penanganan tanah dan lahan serta bioremediasisecara gabungan hanya berkontribusi sebesar 9,3% dari total biaya. Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur biaya pemulihan lingkungan pesisir tercemar hidrokarbon pada kasus ini didominasi oleh biaya logistik dan fasilitas pendukung, bukan oleh biaya penanganan teknis kontaminasi itu sendirisesebuah pola yang perlu menjadi perhatian dalam perencanaan pemulihan kasus serupa di masa mendatang, mengingat pendekatan remediation cost menekankan bahwa seluruh kebutuhan pemulihan, termasuk pengelolaan material di luar lokasi, merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari total biaya remediasi

(Appraisal Institute, 2013).

Hasil penelitian ini menegaskan pentingnya penyusunan estimasi biaya yang terstruktur berdasarkan tahapan kegiatan sebagai dasar perencanaan pemulihan ekosistem pesisir yang tercemar hidrokarbon, sejalan dengan amanat Pasal 54 Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup yang mewajibkan pemulihan fungsi lingkungan hidup melalui tahapan yang terencana. Secara khusus, temuan mengenai dominasi biaya lahan TPS mengindikasikan bahwa perencanaan pemulihan sebaiknya mempertimbangkan alternatif lokasi dan skema pemanfaatan lahan sejak tahap awal, karena keputusan tersebut memiliki pengaruh yang jauh lebih besar terhadap total biaya dibandingkan variasi pada komponen teknis seperti metode bioremediasi atau kepadatan tanam revegetasi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah diuraikan, penelitian ini menyimpulkan bahwa kuantitas dan volume kebutuhan pada setiap tahapan kegiatan pemulihan berhasil ditentukan berdasarkan kondisi luas, vegetasi, serta tanah dan substrat pada area terdampak. Luas area pemulihan ditetapkan sebesar 3.800 m² mengacu pada hasil pengukuran Badan Pertanahan Nasional (BPN), dengan asumsi kedalaman pengerukan substrat 0,8 m sehingga diperoleh volume material terdampak sebesar 3.040 m³. Kondisi vegetasi yang tidak seragam terdiri atas mangrove mati, mangrove hidup, dan regenerasi alami serta variasi tingkat kontaminasi substrat antarbagian area menjadi dasar bahwa penanganan tidak dapat diasumsikan seragam pada seluruh luas kajian, sehingga kuantitas setiap tahapan kegiatan, mulai dari persiapan, penanganan substrat, bioremediasi, hingga revegetasi (± 1.689 bibit) dan monitoring (12 periode selama tiga tahun), disusun berdasarkan kebutuhan teknis masing-masing.

Estimasi biaya untuk setiap tahapan kegiatan pemulihan juga berhasil disusun dengan menerapkan konsep remediation cost. Hasil perhitungan menunjukkan total estimasi biaya pemulihan ekosistem mangrove sebesar Rp23.158.025.000, yang terdiri atas biaya persiapan dan fasilitas pendukung (Rp18.277.500.000), penanganan tanah dan lahan (Rp1.305.800.000), bioremediasi (Rp857.500.000), revegetasi, pemeliharaan, dan monitoring (Rp717.225.000), serta operasional tempat penyimpanan sementara/TPS (Rp2.000.000.000).

Selanjutnya, komponen biaya yang memberikan kontribusi paling signifikan terhadap total estimasi biaya pemulihan adalah pengadaan lahan TPS seluas 800 m², dengan nilai Rp16.000.000.000 atau setara 69,1% dari total biaya pemulihan secara keseluruhan. Temuan ini menunjukkan bahwa besaran biaya pemulihan ekosistem mangrove pada kasus ini lebih banyak dipengaruhi oleh keputusan terkait lokasi dan status kepemilikan lahan fasilitas pendukung di luar area rehabilitasi, dibandingkan oleh kompleksitas teknis penanganan pencemaran hidrokarbon di lokasi terdampak itu sendiri. Implikasinya, perencanaan anggaran pemulihan ekosistem pesisir yang tercemar hidrokarbon perlu mempertimbangkan alternatif skema pemanfaatan lahan TPS sejak tahap awal perencanaan, karena keputusan tersebut berpotensi memberikan pengaruh yang jauh lebih besar

terhadap total biaya dibandingkan variasi pada komponen teknis lainnya.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan konsep *remediation cost* melalui penguraian kegiatan pemulihan ke dalam komponen biaya yang terukur dan dapat ditelusuri mampu menghasilkan estimasi biaya yang komprehensif sekaligus mengungkap struktur biaya yang tidak selalu tampak pada pendekatan perhitungan sederhana. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar teknis bagi perencanaan pembiayaan pemulihan Ekosistem Mangrove Tahura Ngurah Rai di area Teluk Benoa, sekaligus menjadi kerangka rujukan bagi penyusunan estimasi biaya pada kasus pencemaran ekosistem pesisir tercemar hidrokarbon lainnya di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, D. F., Yulianto, B., & Subagiyo, S. (2026). Kajian Ekosistem Mangrove Pasca-Insiden Tumpahan Minyak Di Pantai Sedari, Kabupaten Karawang, Jawa Barat. *Jurnal Kelautan Tropis*, 29(2), 267-278.
- Andika, I. B. M. B., Kusmana, C., & Nurjaya, I. W. (2019). Dampak pembangunan Jalan Tol Bali Mandara terhadap ekosistem mangrove di Teluk Benoa Bali. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan* (Journal of Natural Resources and Environmental Management), 9(3), 641–657. <https://doi.org/10.29244/jpsl.9.3.641-657>
- Appraisal Institute. 2013. *The Appraisal of Real Estate*. 14th Edition. Chicago, Illinois:
- 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.
- Bosire, J.O., Dahdouh-Guebas, F., Walton, M., Crona, B., Lewis III, R.R., Field, C.D., Kairo, J.G., dan Koedam, N. 2008. Functionality of Restored Mangroves: A Review. *Aquatic Botany*, 89: 251–259. DOI 10.1016/j.aquabot.2008.03.010.
- Primavera, J.H. dan Esteban, J.M.A. 2008. A Review of Mangrove Rehabilitation in the Philippines: Successes, Failures and Future Prospects. *Wetlands Ecology and Management*, 16(5): 345–358. DOI 10.1007/s11273-008-9101-y.
- Velati, Z. A., Suryono, S., & Pratikto, I. (2024). Jenis substrat dan tingkat kepadatan mangrove di kawasan konservasi mangrove Baros Yogyakarta. *Journal of Marine Research*, 13(4), 739-745.
- Gundlach, E. R., Giadom, F. D., Akpokodje, E. G., Bonte, M., Tse, A. C., Ekeocha, N. E., ... & Acra, E. J. (2021). Core sediments and oil chemistry from contaminated mangroves in eastern Niger Delta, Ogoniland, Nigeria. *Marine pollution bulletin*, 171, 112714.

