



Tersedia online di: <http://ejournal-balitbang.kkp.go.id/index.php/jppi>

e-mail: jppi.puslitbangkan@gmail.com

JURNAL PENELITIAN PERIKANAN INDONESIA

Volume 32 Nomor 1 Maret 2026

p-ISSN: 0853-5884

e-ISSN: 2502-6542

Nomor Akreditasi RISTEK-BRIN: 148/M/KPT/2020

JURNAL
PENELITIAN
PERIKANAN
INDONESIA



PENILAIAN JASA EKOSISTEM HUTAN MANGROVE KOTA SORONG: KETIDAK-SEIMBANGAN PASOKAN-PERMINTAAN DAN IMPLIKASI PENGELOLAAN

ECOSYSTEM SERVICE ASSESSMENT OF SORONG CITY'S MANGROVE FORESTS: SUPPLY-DEMAND IMBALANCE AND MANAGEMENT IMPLICATIONS

Korneles Huwaë^{1*}, Gatot Yulianto¹, Ario Damar¹, Ismail²

¹Pengelolaan Sumberdaya Pesisir dan Lautan, Departemen Manajemen Sumberdaya Perairan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB University

²Teknik Penangkapan Ikan Politeknik Kelautan dan Perikanan Bone

Teregistrasi I tanggal: 19 Januari 2026; Diterima setelah perbaikan I tanggal: 18 Februari 2026; Disetujui terbit tanggal: 11 Maret 2026

ABSTRAK

Ekosistem mangrove menyediakan rangkaian jasa ekosistem penting yang menopang kesejahteraan jutaan masyarakat pesisir secara global, namun menghadapi degradasi akibat tekanan antropogenik yang terus meningkat. Penelitian ini mengkaji ketidakseimbangan pasokan-permintaan jasa ekosistem hutan mangrove Kota Sorong, Papua Barat Daya. Pendekatan triangulasi diterapkan melalui kajian literatur sistematis, wawancara mendalam terhadap 78 responden dari enam kelompok pemangku kepentingan, dan observasi lapangan pada 12 stasiun dengan 36 plot vegetasi menggunakan kerangka CICES v5.1. Matriks pasokan-permintaan dikembangkan menggunakan expert-based scoring yang divalidasi dengan data biofisik untuk 20 jasa ekosistem. Hasil menunjukkan ketidakseimbangan kritis: jasa budaya berkapasitas tinggi (43,7% dari total) sangat kurang dimanfaatkan (utilisasi 6-10%), sementara jasa penyediaan kayu mengalami eksploitasi berlebih (ekstraksi 3-4× kapasitas regenerasi), menyebabkan degradasi 15-20 ha/tahun dan penurunan kerapatan kanopi dari 93,95% (2015) menjadi 50,51% (2025). Kemiskinan energi merupakan pendorong utama dengan 100% rumah tangga bergantung pada kayu bakar mangrove. Strategi pengelolaan direkomendasikan meliputi: pengembangan ekowisata berbasis masyarakat (potensi Rp 320-912 juta/tahun), transisi energi, skema pembayaran jasa karbon biru (potensi Rp 1,09-3,85 miliar/tahun), dan penguatan tata kelola kolaboratif untuk mencegah kolaps ekosistem dalam 15-20 tahun.

Kata kunci: *Jasa ekosistem mangrove; CICES v5.1; Analisis pasokan-permintaan; Ketidakseimbangan jasa ekosistem; Pengelolaan berbasis masyarakat; Karbon biru; Pengelolaan pesisir; Papua Barat Daya*

ABSTRACT

Mangrove ecosystems provide a vital suite of ecosystem services that sustain the well-being of millions of coastal inhabitants globally, yet they face intensifying degradation due to escalating anthropogenic pressures. This study examines the supply-demand imbalance of ecosystem services within the mangrove forests of Sorong City, Southwest Papua. A triangulation approach was employed, integrating a systematic literature review, in-depth interviews with 78 respondents across six stakeholder groups, and field observations at 12 stations comprising 36 vegetation plots, all framed within the CICES v5.1 classification. A supply-demand matrix was developed using an expert-based scoring system, subsequently validated with biophysical data for 20 ecosystem services. The results reveal a critical imbalance: while cultural services possess high capacity (accounting for 43.7% of the total), they remain significantly underutilized (6–10% utilization). In contrast, wood provisioning

Korespondensi penulis:
huwaedison@apps.ipb.ac.id

services are overexploited, with extraction rates reaching 3–4 times the natural regeneration capacity. This overexploitation has led to a degradation rate of 15–20 hectares per year and a drastic reduction in canopy density, falling from 93.95% in 2015 to 50.51% in 2025. Energy poverty serves as the primary driver, with 100% of local households relying on mangrove fuelwood. Recommended management strategies include: the development of community-based ecotourism (potential revenue of IDR 320–912 million/year), energy transition initiatives, blue carbon payment for ecosystem services (PES) schemes (potential value of IDR 1.09–3.85 billion/year), and the strengthening of collaborative governance to prevent total ecosystem collapse within the next 15–20 years.

KEYWORDS: *Mangrove ecosystem services; CICES v5.1; Supply-demand analysis; Ecosystem service imbalance; Community-based management; Blue carbon; Coastal management; Southwest Papua*

PENDAHULUAN

Ekosistem mangrove merupakan salah satu sistem sosial-ekologis paling produktif di zona pesisir tropis, menyediakan rangkaian jasa ekosistem esensial yang menopang kesejahteraan jutaan masyarakat pesisir secara global (Barbier, 2016; Costanza et al., 2014). Jasa-jasa tersebut meliputi perlindungan pantai dari abrasi dan gelombang ekstrem, dukungan produktivitas perikanan melalui fungsi nursery ground, sequestrasi karbon dalam jumlah signifikan (955 Mg C ha⁻¹), regulasi kualitas air, serta manfaat budaya dan rekreasi (Donato et al., 2011; Spalding et al., 2014). Valuasi ekonomi global menunjukkan bahwa mangrove menyediakan jasa bernilai US\$ 194.000 per hektar per tahun, melampaui sebagian besar ekosistem terestrial lainnya (Costanza et al., 2014). Namun, terlepas dari nilai strategisnya, mangrove mengalami degradasi dengan laju mengkhawatirkan mencapai 0,5-3% per tahun di negara berkembang, terutama akibat konversi untuk tambak, ekstraksi kayu berlebihan, dan pembangunan infrastruktur pesisir yang tidak terencana (Carrasquilla-Henao & Juanes, 2017; Friess et al., 2020; Goldberg et al., 2020)

Indonesia, sebagai negara dengan tutupan mangrove terluas di dunia (sekitar 3,1 juta hektar atau 23% dari total global), menghadapi paradoks konservasi yang kompleks (Giri et al., 2011; Murdiyarto et al., 2015). Meskipun memiliki regulasi perlindungan yang komprehensif, termasuk Undang-Undang No. 27 Tahun 2007 tentang Pengelolaan Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil, Peraturan Presiden No. 73 Tahun 2012 tentang Strategi Nasional Pengelolaan Ekosistem Mangrove, dan komitmen Indonesia dalam *Nationally Determined Contribution (NDC)* untuk rehabilitasi 600.000 hektar mangrove pada periode 2020-2024, laju deforestasi mangrove Indonesia mencapai 52.000 hektar per tahun pada periode 2000-2012, dengan kerugian ekonomi diestimasi

mencapai US\$ 420 juta per tahun (Richards & Friess, 2016). Tekanan degradasi terutama intensif di wilayah Indonesia Timur, dimana tingkat kemiskinan tinggi (>20%), keterbatasan infrastruktur, dan ketergantungan langsung terhadap sumber daya alam mendorong ekstraksi tidak berkelanjutan (Kusmana & Sukristijono, 2016). Papua Barat, dengan tutupan mangrove seluas ±161.000 hektar, merepresentasikan kasus kritis dimana ekosistem mangrove menopang lebih dari 15.000 rumah tangga pesisir melalui jasa penyediaan langsung (perikanan, kayu bakar, bahan konstruksi) dan jasa pengaturan tidak langsung (perlindungan pantai, regulasi banjir rob, pemeliharaan habitat). Di Kota Sorong, implementasi Rencana Zonasi Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil (RZWP3K) Provinsi Papua Barat Daya mengalami hambatan karena konflik kepentingan antara konservasi dan pembangunan ekonomi, khususnya ekspansi pelabuhan dan kawasan industri (DKP Kota Sorong, 2022).

Literatur ilmiah telah mendokumentasikan secara ekstensif pentingnya jasa ekosistem mangrove melalui pendekatan valuasi ekonomi (Costanza et al., 2014; Vo et al., 2013), penilaian biofisik (Donato et al., 2011; Hutchison et al., 2014), dan analisis persepsi masyarakat (Szabó et al., 2004). Namun, mayoritas studi tersebut mengadopsi pendekatan *supply-side* yang fokus pada kapasitas penyediaan jasa tanpa mempertimbangkan dinamika permintaan aktual dan pola pemanfaatan masyarakat (Burkhard et al., 2012; Wolff et al., 2015). Kerangka *supply-demand-budget* yang mengintegrasikan kapasitas ekosistem (**supply**), kebutuhan masyarakat (**demand**), dan ketersediaan bersih (**budget**) telah terbukti efektif untuk mengidentifikasi ketidakseimbangan dan merancang intervensi pengelolaan (Schröter et al., 2014; Bagstad et al., 2014). Meskipun demikian, penerapan kerangka tersebut pada ekosistem mangrove Indonesia, khususnya di wilayah Papua yang terbatas data, masih sangat minim.

Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) versi 5.1 menyediakan standar komprehensif untuk klasifikasi dan penilaian jasa ekosistem (Haines-Young, 2023), namun adopsinya dalam konteks mangrove tropis Indonesia belum optimal. Lebih lanjut, penelitian sebelumnya di Papua Barat cenderung bersifat deskriptif dan tidak mengintegrasikan dimensi spasial-temporal dalam analisis pasokan-permintaan (misalnya, Baigo Hamuna et al., 2018). Kesenjangan pengetahuan ini menghasilkan kebijakan pengelolaan yang kurang responsif terhadap dinamika sosial-ekologis lokal dan seringkali gagal mencapai tujuan konservasi sekaligus pengentasan kemiskinan.

Penelitian ini bertujuan mengisi kesenjangan tersebut dengan mengkaji dinamika pasokan-permintaan jasa ekosistem mangrove Kota Sorong menggunakan kerangka analisis terintegrasi yang menggabungkan penilaian biofisik, survei sosial-ekonomi, dan pemetaan partisipatif. Berbeda dengan penelitian sebelumnya di Papua Barat yang cenderung bersifat deskriptif dan fokus pada penilaian kondisi biofisik tanpa mengintegrasikan dimensi sosial-ekonomi (misalnya, Hamuna et al., 2018 yang terbatas pada analisis kualitas perairan dan struktur vegetasi), penelitian ini mengadopsi pendekatan *supply-demand-budget* yang holistik dengan mengintegrasikan: (1) klasifikasi jasa ekosistem berbasis CICES v5.1—standar internasional yang belum pernah diterapkan secara sistematis pada mangrove Papua; (2) kuantifikasi pasokan menggunakan data biofisik multikomponen (perakaran, batang, kanopi, substrat, kolom air, propagul) yang diintegrasikan dengan *expert scoring* dan validasi lapangan; (3) penilaian permintaan multi-stakeholder yang merepresentasikan enam kelompok pemangku kepentingan dengan metodologi sampling yang ketat; (4) analisis ketidakseimbangan spasial-temporal menggunakan matriks budget yang mengidentifikasi jasa kritis yang mengalami defisit; dan (5) analisis efek berantai degradasi (*cascade effects*) yang menghubungkan eksploitasi kayu dengan penurunan *multiple* jasa melalui feedback loops sosial-ekologis.

Secara spesifik, penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengidentifikasi dan mengkaraktirasi jasa ekosistem yang disediakan oleh komponen struktural mangrove berbeda (zonasi tepi sungai, zonasi tengah, zonasi luar) berdasarkan klasifikasi CICES v5.1, (2) mengkuantifikasi kapasitas pasokan biofisik dan tingkat permintaan masyarakat untuk setiap kategori jasa menggunakan indikator terukur, (3) menganalisis ketidakseimbangan pasokan-permintaan serta implikasinya terhadap keberlanjutan ekosistem dan kesejahteraan

masyarakat, dan (4) mengembangkan rekomendasi pengelolaan berbasis bukti yang mengintegrasikan prinsip konservasi ekosistem dan pembangunan berkelanjutan. Hipotesis yaitu bahwa: (H1) terdapat ketidakseimbangan spasial signifikan antara kapasitas pasokan dan permintaan masyarakat terhadap jasa mangrove, dengan defisit terjadi pada zona-zona dengan tekanan antropogenik tinggi, dan (H2) ketidakseimbangan tersebut berkorelasi positif dengan tingkat degradasi ekosistem yang diindikasikan oleh penurunan kerapatan vegetasi dan keanekaragaman jenis.

Kebaruan ilmiah yang signifikan dibandingkan dengan studi-studi sebelumnya, terutama melalui pendekatan integratif yang diterapkan pada ekosistem mangrove di Papua Barat Daya. Kebaruan utama terletak pada pelopor penggunaan kerangka kerja CICES v5.1 secara komprehensif untuk membedah dimensi biofisik, sosial-ekonomi, serta kebijakan dalam satu analisis sistematis yang utuh. Melalui integrasi ini, penelitian berhasil mengkuantifikasi ketidakseimbangan antara *supply* (penyediaan) dan *demand* (permintaan) jasa ekosistem menggunakan matriks yang telah divalidasi dengan data lapangan yang presisi. Lebih lanjut, studi ini memberikan kontribusi teoretis baru dengan mengidentifikasi mekanisme *feedback loops* dan *cascade effects* yang menghubungkan isu kemiskinan energi dengan degradasi ekosistem secara kausal. Sebagai pelengkap, penelitian ini juga menyajikan valuasi ekonomi terhadap jasa *non-market*, khususnya pada sektor ekowisata dan karbon biru (*blue carbon*), dengan metodologi yang dirancang agar memiliki tingkat replikasi yang tinggi untuk diterapkan di wilayah pesisir lainnya

BAHAN DAN METODE

Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di ekosistem mangrove Kota Sorong, Papua Barat, Indonesia (0°52'S - 0°55'S; 131°14'E - 131°18'E), yang membentuk bagian dari kompleks mangrove Teluk Bintuni yang lebih luas. Kawasan penelitian meliputi area seluas 1.425,84 ha yang terbagi dalam tiga zona ekologis utama: (1) zona tepi sungai (*riverine*) dengan dominasi *Rhizophora apiculata* dan *R. mucronata* (±580 ha, 40,7%), (2) zona peralihan (transitional) yang didominasi *Avicennia marina* dan *A. alba* (±485 ha, 34,0%), dan (3) zona terluar (*fringing*) dengan vegetasi campuran *Sonneratia alba*, *Bruguiera*

gymnorhiza, dan *Xylocarpus granatum* (± 361 ha, 25,3%). Kawasan mengalami rezim pasang surut bertipe semi-diurnal dengan amplitudo rata-rata 2,35 m (kisaran 1,8-3,1 m), salinitas permukaan 28-32 ppt, dan substrat dominan berupa lumpur berpasir dengan kandungan organik 4,5-8,2%.

Kerangka Konseptual dan Desain Penelitian

Penelitian ini mengadopsi kerangka *Ecosystem Services Cascade Model* (Haines-Young & Potschin, 2010) yang diintegrasikan dengan pendekatan *supply-demand-budget* (Burkhard et al., 2012; Schröter et al., 2014). Jasa ekosistem diklasifikasikan mengikuti *Common International Classification of Ecosystem Services* (CICES) versi 5.1 (Roy Haines-Young & Potschin, 2018) ke dalam tiga kategori hierarkis:

- Jasa Penyediaan (*Provisioning Services*, PS): Produk material yang diperoleh langsung dari ekosistem (biomassa, air, bahan genetik)
- Jasa Pengaturan dan Pemeliharaan (*Regulating & Maintenance Services*, RS): Regulasi proses ekosistem yang bermanfaat bagi manusia (mitigasi bencana, siklus nutrisi, regulasi iklim)
- Jasa Budaya (*Cultural Services*, CS): Manfaat non-material dari interaksi manusia-ekosistem (rekreasi, spiritual, pendidikan)

Penilaian jasa menggunakan kerangka matriks tiga komponen terintegrasi:

$$\text{Budget}_{ij} = \text{Supply}_{ij} - \text{Demand}_{ij} \dots \dots \dots 1$$

Dimana:

- Supply_{ij} = Kapasitas komponen struktural i menyediakan jasa j berdasarkan kondisi biofisik (skala 0-5)
- Demand_{ij} = Intensitas pemanfaatan dan kebutuhan pemangku kepentingan terhadap jasa j (skala 1-5)
- Budget_{ij} = Ketersediaan bersih; nilai positif = surplus, nilai negatif = defisit

Desain penelitian bersifat *mixed-methods*, menggabungkan data kuantitatif (pengukuran biofisik, survei terstruktur) dan kualitatif (wawancara mendalam, observasi partisipatif) untuk meningkatkan validitas temuan (John W. Creswell & Vicki L. Plano Clark, 2017).

Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan pendekatan triangulasi yang mengintegrasikan tiga metode pengumpulan data. Pertama, kajian literatur sistematis terhadap 45 publikasi *peer-reviewed*

(2010-2023) dilakukan menggunakan protokol PRISMA dari basis data Scopus, *Web of Science*, dan *Google Scholar* untuk menetapkan baseline jasa ekosistem mangrove dan mengembangkan protokol kuantifikasi. Kedua, survei biofisik dilakukan pada 12 stasiun observasi permanen (zona *riverine* $n=5$, *transitional* $n=4$, *fringing* $n=3$) yang ditetapkan menggunakan *stratified random sampling* untuk mengukur parameter struktur vegetasi (kerapatan, DBH, biomassa), substrat (tekstur, kandungan organik, pH, salinitas) dan biodiversitas dalam plot 10 m \times 10 m. Observasi partisipatif selama 96 hari dilakukan dalam dua periode musiman (musim timur/kemarau Juli-September 2025, dan musim barat/hujan Desember 2025). Ketiga, wawancara semi-terstruktur dilakukan terhadap 78 responden yang dipilih melalui *purposive* dan *snowball sampling*, merepresentasikan enam kelompok pemangku kepentingan: masyarakat pesisir (38,5%), nelayan tradisional (25,6%), pemandu wisata (7,7%), penebang kayu (6,4%), pejabat pemerintah (5,1%), akademisi (12,8%), dan tokoh masyarakat (3,8%). Protokol wawancara mencakup lima modul utama (identifikasi jasa, penilaian kepentingan dengan skala Likert 5 poin, pola pemanfaatan, persepsi perubahan, dan preferensi pengelolaan) dengan durasi rata-rata 62 menit per sesi. Penelitian memperoleh persetujuan etik dengan protokol *informed consent* tertulis, *confidentiality* data, dan kompensasi responden, serta triangulasi data dilakukan dengan membandingkan respons antar kelompok dan memvalidasi dengan observasi lapangan.

Analisis Data

Jasa ekosistem diidentifikasi melalui triangulasi kajian literatur, wawancara pemangku kepentingan (*free-listing*), dan observasi lapangan, dengan konvergensi antar sumber dianalisis menggunakan matriks *cross-validation*. Setiap jasa dikarakterisasi berdasarkan kode CICES v5.1 [R1.1]. Penggunaan kerangka CICES v5.1 digunakan karena menyediakan sistem klasifikasi hierarkis terstandarisasi yang memfasilitasi komparabilitas dengan studi global dan memungkinkan agregasi data pada berbagai tingkat resolusi—dari kelas (*class*) hingga tipe jasa (*type*)—yang tidak tersedia pada kerangka alternatif seperti *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA) yang lebih deskriptif (Maes et al., 2016). Kapasitas pasokan dikuantifikasi menggunakan *expert-based scoring matrix* 6 \times 20 yang mengintegrasikan data biofisik lapangan (bobot 50%), estimasi berbasis literatur (30%), dan *expert judgment* melalui metode Delphi (20%), dengan setiap sel dinilai dalam skala ordinal 0-5 (Burkhard

et al., 2012; Jacobs et al., 2015). Total kapasitas pasokan untuk setiap jasa j dihitung sebagai:

$$S_j = \sum_{i=1}^6 w_i \times C_{ij} \dots \dots \dots 2$$

dimana w_i adalah bobot kepentingan relatif komponen i dan C_{ij} adalah skor kapasitas komponen i untuk jasa j (Burkhard et al., 2012), dengan validasi melalui Krippendorff's alpha (>0.70), *sensitivity analysis* ($\pm 20\%$), dan *ground-truthing* ($r > 0.65$). Permintaan pemangku kepentingan dievaluasi menggunakan skala Likert 5 poin dengan agregasi rata-rata kelompok:

$$D_{kj} = \frac{1}{n_k} \sum_{r=1}^{n_k} L_{rkj} \dots \dots \dots 3$$

dimana L_{rkj} adalah skor Likert responden r dari kelompok k untuk jasa j, dan n_k adalah ukuran sampel kelompok (Jacobs et al., 2015). Permintaan agregat total dihitung dengan pembobotan berdasarkan ukuran populasi. Anggaran jasa ekosistem (ketersediaan bersih) dihitung sebagai:

$$B_j = S_j - D_j \dots \dots \dots 4$$

dengan $B_j > 0$ menunjukkan surplus berkelanjutan, $B_j \approx 0$ seimbang namun rentan, dan $B_j < 0$ defisit tidak berkelanjutan (Bagstad et al., 2013). Jasa kritis diidentifikasi sebagai jasa dengan $|B_j| < \theta$ dimana threshold θ ditetapkan sebagai 20% [$R2.1$] dari nilai pasokan maksimal yang memerlukan prioritas intervensi. Penetapan threshold 20% ini mengikuti rekomendasi Schröter et al. (2014) dan Burkhard et al. (2014) yang menetapkan batas 15-25% sebagai zona kritis (*critical zone*) dalam analisis budget jasa ekosistem, dimana ketidakseimbangan pada rentang ini mengindikasikan risiko tinggi terhadap keberlanjutan jasa dalam jangka menengah (10-15 tahun). Threshold ini juga konsisten dengan konsep *ecological safe operating space* dimana sistem yang beroperasi $< 80\%$ kapasitas masih memiliki resiliensi memadai, sementara sistem dengan budget $< 20\%$ kapasitas berada dalam zona risiko tinggi kolaps (Rockström et al., 2009; Steffen et al., 2015)

HASIL DAN BAHASAN

Jasa Ekosistem Teridentifikasi

Dua puluh jasa ekosistem teridentifikasi melalui triangulasi kajian literatur sistematis, wawancara pemangku kepentingan, dan observasi lapangan, kemudian diklasifikasikan menggunakan kerangka CICES v5.1 (Haines-Young & Potschin, 2018). Klasifikasi hierarkis ini memfasilitasi komparabilitas dengan studi global dan memungkinkan agregasi data pada

berbagai tingkat resolusi ((Maes et al., 2016).

a. Jasa Penyediaan (6 jasa, kode PS1-PS6)

Jasa penyediaan yang menghasilkan produk material langsung meliputi: tangkapan ikan (PS1) dengan kontribusi utama dari kolom air sebagai *habitat feeding* dan sistem perakaran sebagai refugia (Nagelkerken et al., 2008); panen kepiting bakau *Scylla serrata* (PS2) yang bergantung pada kompleks akar dan substrat berlumpur sebagai *habitat burrowing* (Lee, 2015); tangkapan udang penaeid (PS3) yang memanfaatkan *nursery ground* mangrove pada fase juvenil (Ronnback et al., 2002); kayu konstruksi (PS4) terutama dari spesies *Rhizophora* untuk tiang bangunan dan perahu tradisional; kayu bakar dan arang (PS5) yang menjadi sumber energi utama rumah tangga pesisir (Carrasquilla-Henao & Juanes, 2017); serta buah/daun untuk konsumsi dan obat tradisional (PS6) dari kanopi dan propagul *Avicennia*, *Sonneratia*, dan *Xylocarpus* (Kathiresan & Bingham, 2001). Komponen batang menjadi penyedia dominan untuk PS4 dan PS5, namun memiliki kapasitas regenerasi terbatas (9 poin dari maksimal 30 poin) karena siklus hidup pohon mangrove yang panjang (15-30 tahun untuk mencapai ukuran panen) dan laju pertumbuhan relatif lambat dibandingkan hutan terrestrial (Alongi, 2012). Keterbatasan ini menciptakan kerentanan signifikan terhadap eksploitasi berlebih, sebagaimana terdokumentasi dalam berbagai kasus degradasi mangrove Asia Tenggara (Richards & Friess, 2016).

b. Jasa Pengaturan dan Pemeliharaan (7 jasa, kode RS1-RS7)

Jasa pengaturan yang mengatur proses ekologis dan mendukung ketahanan ekosistem meliputi: perlindungan erosi pantai (RS1) melalui stabilisasi sedimen oleh sistem perakaran yang kompleks dan pneumatophores (Mazda et al., 1997); redaman gelombang (RS2) dengan efektivitas disipasi energi 70-90% pada zona vegetasi 100 m (Mcivor et al., 2012); pencegahan intrusi air laut (RS3) melalui barrier hidrodinamik yang menurunkan salinitas air tanah pesisir hingga 2-5 ppt (Krauss et al., 2008); sekuestrasi dan penyimpanan karbon (RS4) dengan kontribusi tertinggi dari substrat organosedimentary yang menyimpan 150-250 ton C/ha pada kedalaman 1 meter, menjadikan mangrove sebagai *blue carbon hotspot* global (Donato et al., 2011; Alongi, 2014); produksi oksigen (RS5) dari kanopi melalui fotosintesis dengan produktivitas primer bersih 5-15 ton C/ha/tahun (Twilley et al., 1992); regulasi kualitas air (RS6) melalui biofiltrasi substrat yang menurunkan *suspended sediment*, nitrogen, dan fosfor 30-70% (Tam & Wong, 2000); dan fungsi

Komponen Struktural	PS1 Item	PS2 Kepiting	PS3 Udang	PS4 Kayu Bangunan	PS5 Kayu Bakar	PS6 Buah/Daun	RS1 Art: Abstrak	RS2 Penemuan Galombang	RS3 Art: Intrusi	RS4 Karbon	RS5 Obesigen	RS6 Kualitas Air	RS7 Nursery ground	CS1 Ekowisata	CS2 Boardwalk	CS3 Pendidikan	CS4 Estetika	CS5 Nilai Keberadaan	CS6 Nilai Warisan	CS7 Spiritual	Total	
Substrat	3	2	2	-	-	2	3	3	3	7	1	5	3	2	2	3	2	3	4	2	52	
Kolom Air	5	3	4	-	-	-	2	2	2	2	3	3	5	3	3	3	3	3	3	3	2	51
Sistem Perakaran	4	5	4	1	1	1	5	5	5	3	2	4	5	4	5	4	5	4	4	3	74	
Batang	1	1	-	5	5	1	3	3	2	4	2	2	2	2	3	2	3	2	3	2	48	
Kanopi/Daun	3	2	2	-	-	1	4	4	3	4	5	3	3	5	4	5	7	5	5	4	69	
Buah/Propagul	1	1	1	-	-	2	2	2	2	3	2	2	3	3	2	3	3	4	4	5	45	
Total per Jasa	17	14	13	6	6	7	19	19	17	23	15	19	21	19	19	20	23	21	23	18	295	

Skala Kontribusi:

0 = Tidak ada kontribusi 1 = Sangat rendah 2 = Rendah 3 = Sedang 4 = Tinggi 5 = Sangat tinggi 6-7 = Maksimal

Kategori Jasa:

PS = Jasa Penyediaan (59 poin, 20%) RS = Jasa Pengaturan (107 poin, 36,3%) CS = Jasa Budaya (129 poin, 43,7%)

Catatan:

Total kapasitas pasokan = 295 poin (49,2% dari maksimal 600 poin)
 Sistem perakaran memberikan kontribusi tertinggi dan paling multifungsi
 Substrat memberikan kontribusi maksimal (skor 7) untuk penyimpanan karbon
 Jasa budaya mendominasi kapasitas (43,7%) namun hanya memanfaatkan 6-10%

Gambar 1. Matriks Pasokan (Supply Matrix) Jasa Ekosistem Mangrove
 Figure 1. Mangrove Ecosystem Services Supply Matrix

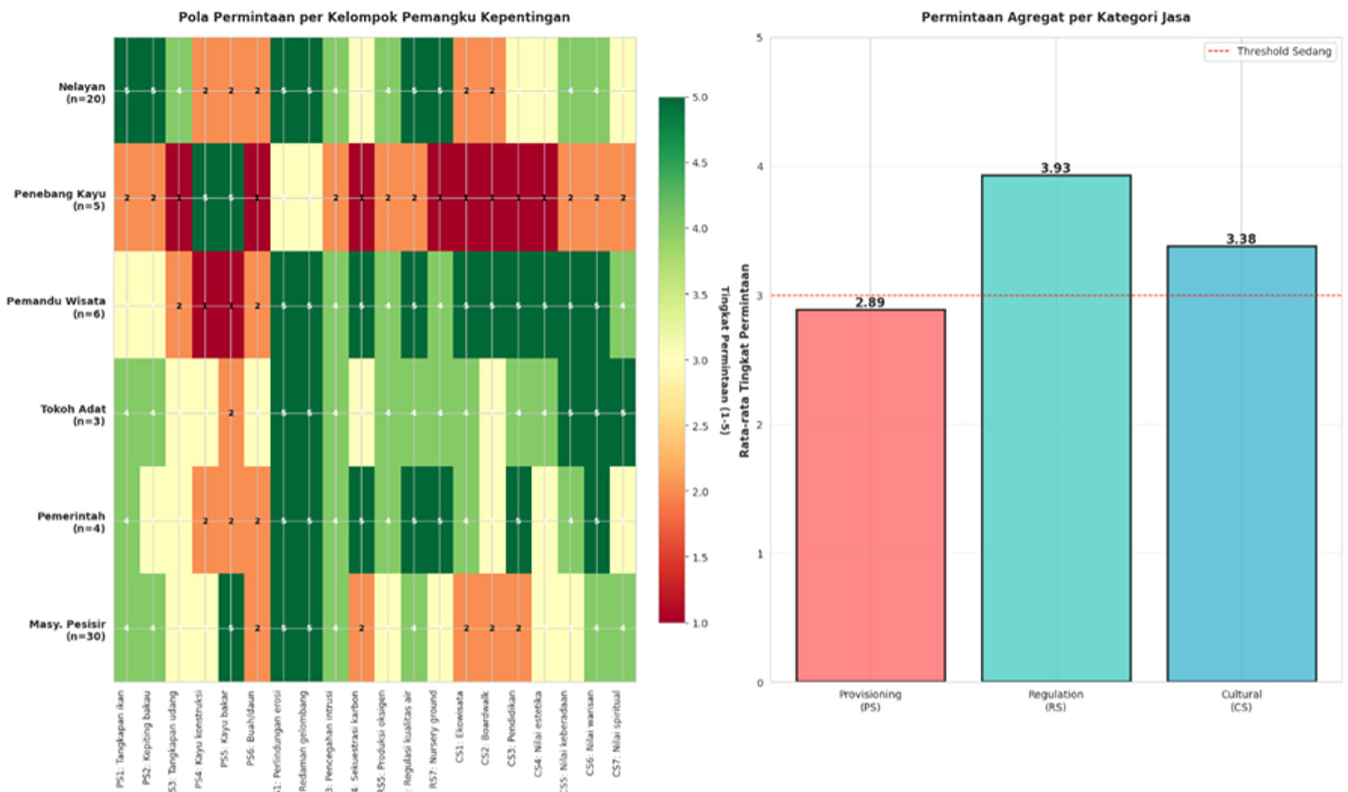
habitat nursery ground (RS7) yang mendukung fase juvenil lebih dari 120 spesies ikan komersial Indo-Pasifik (Nagelkerken et al., 2008). Sistem perakaran merupakan komponen paling multifungsi dengan skor kontribusi maksimal (5 poin) untuk lima jasa pengaturan, mencerminkan kompleksitas struktural tiga dimensi yang menciptakan microhabitat heterogen dan meningkatkan *surface area* untuk kolonisasi biota (Ellison & Farnsworth, 1996). Arsitektur perakaran ini berfungsi sebagai *ecosystem engineer* yang memodifikasi kondisi fisik-kimia lingkungan dan memfasilitasi berbagai proses ekologis kunci (Jones et al., 1994).

c. Jasa Budaya (7 jasa, kode CS1-CS7)

Jasa budaya yang mendukung kehidupan spiritual, sosial, dan intelektual meliputi: ekowisata dan rekreasi (CS1) dengan kapasitas 19 poin yang mencakup *birdwatching*, *kayaking*, dan fotografi alam; infrastruktur boardwalk mangrove (CS2) sebagai platform akses wisata edukasi;

pendidikan dan penelitian (CS3) dengan kapasitas 19 poin yang menjadikan kawasan sebagai *living laboratory* untuk institusi akademik lokal dan internasional; nilai estetika dan inspirasi (CS4) dari lanskap unik mangrove dengan kapasitas 18 poin; nilai keberadaan (*existence value*) (CS5) dengan kapasitas tertinggi 21 poin, mencerminkan kesediaan masyarakat membayar untuk konservasi meskipun tidak menggunakan langsung (Krutilla, 1967); nilai warisan budaya (CS6) sebagai jasa berkapasitas paling tinggi (22 poin) yang mengintegrasikan pengetahuan tradisional, ritual adat, dan identitas kelompok etnis pesisir Papua; serta nilai spiritual dan religius (CS7) dimana mangrove dianggap *sacred landscape* dalam kosmologi masyarakat adat (Verschuuren et al., 2012). Seluruh komponen struktural berkontribusi pada jasa budaya dengan total kapasitas 129 poin (43,7% dari total kapasitas sistem), mengindikasikan pentingnya nilai non-material dalam total nilai ekonomi ekosistem (*Total Economic Value*) sebagaimana dikonseptualisasikan

Gambar 2. Matriks Permintaan (Demand Matrix) Jasa Ekosistem Mangrove Kota Sorong, Papua Barat



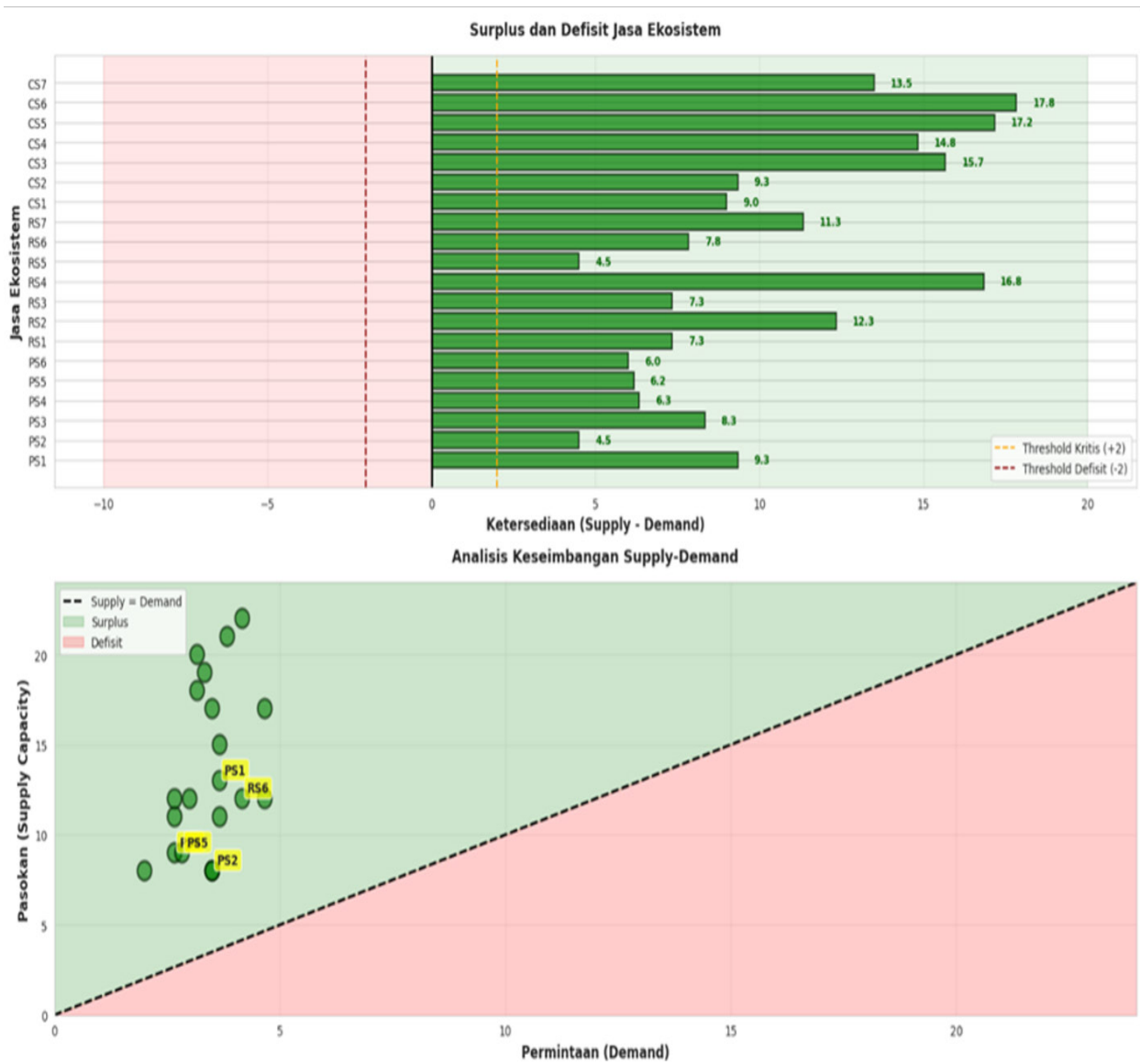
Gambar 2. Matriks Permintaan Jasa Ekosistem Mangrove Kota Sorong
 Figure 2. Mangrove Ecosystem Services Demand Matrix in Sorong City

oleh Pearce & Moran, (1994). Dominasi jasa budaya konsisten dengan pergeseran paradigma valuasi ekosistem yang mengakui kontribusi substansial nilai *non-use* terhadap kesejahteraan manusia (Kumar, 2010; TEEB, 2010). Karakteristik penting yang teridentifikasi mencakup: (1) sistem perakaran sebagai komponen paling kritis karena multifungsionalitas dalam mendukung 12 dari 20 jasa teridentifikasi; (2) jasa budaya mendominasi kapasitas (43,7%) namun kurang dimanfaatkan (utilisasi <10%), mencerminkan hambatan struktural dalam realisasi potensi ekonomi; (3) jasa penyediaan dari batang (PS4-PS5) memiliki kapasitas terendah (18 poin gabungan) namun permintaan tertinggi (skor Likert 5), menciptakan defisit kritis yang mengancam keberlanjutan ekosistem.

Kapasitas Pasokan Jasa Ekosistem

Total kapasitas pasokan mencapai 295 poin (49,2% dari 600 maksimal teoritis), terdistribusi sebagai: jasa budaya 129 poin (43,7%), jasa pengaturan 107 poin (36,3%), dan jasa penyediaan 59 poin (20,0%). Distribusi ini mencerminkan karakteristik fundamental ekosistem mangrove

sebagai penyedia jasa multifungsi dengan dominasi fungsi pengaturan dan budaya (Costanza et al., 2014). Jasa dengan kapasitas tertinggi (>18 poin) adalah nilai warisan (CS6: 22 poin), nilai keberadaan (CS5: 21 poin), sekuestrasi karbon (RS4: 20 poin), pendidikan/penelitian (CS3: 19 poin), ekowisata (CS1: 19 poin), dan nilai estetika (CS4: 18 poin). Sebaliknya, jasa dengan kapasitas terendah (<10 poin) adalah konsumsi buah/daun (PS6: 8 poin), kayu konstruksi (PS4: 9 poin), dan kayu bakar (PS5: 9 poin). Sistem perakaran berkontribusi paling luas dengan memberikan skor maksimal (5 poin) untuk lima jasa: perlindungan erosi, redaman gelombang, *nursery ground*, perikanan kepiting, dan pencegahan intrusi. Hal ini mencerminkan peran kritis kompleksitas struktural dalam fungsi perlindungan maupun produktivitas, konsisten dengan teori *architectural complexity hypothesis* yang menyatakan heterogenitas habitat tiga dimensi meningkatkan keanekaragaman dan produktivitas ekosistem (McCoy & Bell, 1991). Substrat memberikan kontribusi tertinggi pada penyimpanan karbon (skor 7) dengan kapasitas 150-250 ton C/ha pada kedalaman 1 meter, konsisten dengan estimasi global untuk mangrove Indo-Pasifik yang



Gambar 3. Matriks Ketersediaan Jasa Ekosistem Mangrove Kota Sorong
 Figure 3. Mangrove Ecosystem Services Availability Matrix in Sorong City

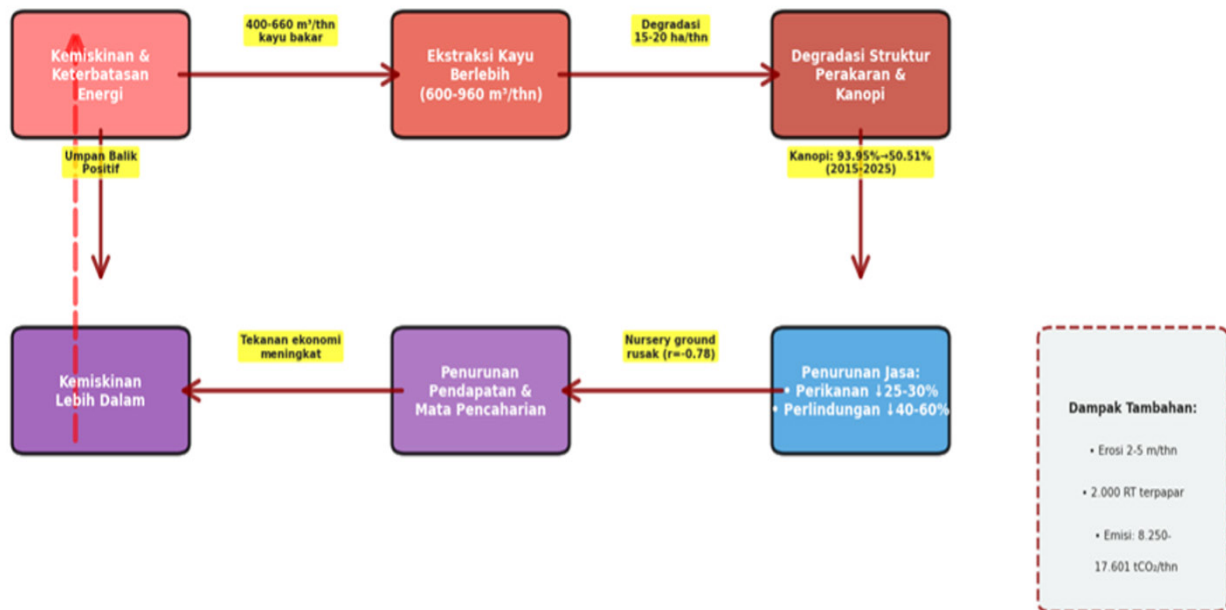
berkisar 105-287 ton C/ha (Donato et al., 2011). Kapasitas ini menempatkan mangrove sebagai ekosistem dengan kepadatan karbon tertinggi di antara ekosistem pesisir, bahkan melebihi hutan hujan tropis (Alongi, 2014; Howard et al., 2017).

Sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 1, matriks pasokan mengungkapkan kontribusi diferensial setiap komponen struktural terhadap portofolio jasa ekosistem. Sistem perakaran menunjukkan skor kontribusi tertinggi kumulatif (total 28 poin untuk seluruh jasa), diikuti oleh substrat (24 poin), kolom air (22 poin), kanopi (20 poin), batang (18 poin), dan propagul (15 poin). Pola ini menggarisbawahi pentingnya mempertahankan integritas struktural komponen bawah permukaan (perakaran dan substrat) yang sering diabaikan

dalam upaya konservasi yang cenderung fokus pada vegetasi atas permukaan (Ewel et al., 1998).

Dominasi jasa budaya dalam kapasitas pasokan (43,7%) sejalan dengan temuan meta-analisis dari mangrove Indo-Pasifik lainnya yang menunjukkan jasa budaya berkontribusi 40-50% dari total nilai ekonomi ekosistem ketika nilai non-use diinternalisasikan (Costanza et al., 2014; M. Brander et al., 2012). Namun, realisasi potensi ini memerlukan penanganan hambatan struktural yang kompleks, termasuk keterbatasan infrastruktur akses, kapasitas kelembagaan untuk pengelolaan wisata berkelanjutan, dan strategi pemasaran destinasi yang efektif (Spalding et al., 2014).

Analisis kelayakan finansial menunjukkan



Gambar 4. Diagram Alir Degradasi Ekosistem dan Umpan Balik Positif
 Figure 4. Flowchart of Ecosystem Degradation and Positive Feedback Loop

pengembangan ekowisata berbasis mangrove dapat meningkatkan pendapatan lokal 10-16 kali lipat (dari Rp 32-57 juta menjadi Rp 320-912 juta per tahun) melalui investasi infrastruktur (*boardwalk* sepanjang 500-800 m, menara pengamatan burung setinggi 12-15 m, *visitor center*, dan fasilitas pendukung), diversifikasi produk wisata (pengamatan burung migratori, *kayaking* melalui terowongan mangrove, *night safari* untuk observasi biota nokturnal), dan promosi digital melalui platform media sosial (Balmford et al., 2015). Dengan investasi awal Rp 500 juta hingga 1 miliar, rasio manfaat-biaya 3-5:1 dalam periode 5 tahun dapat dicapai berdasarkan asumsi tarif masuk Rp 25.000-50.000 per pengunjung dan proyeksi 8.000-15.000 kunjungan tahunan (Spalding et al., 2014; Das & Crépin, 2013). Pengembangan ini berpotensi menyediakan mata pencaharian alternatif berkelanjutan bagi 50-100 orang yang saat ini bergantung pada ekstraksi kayu destruktif, sekaligus menggeser insentif ekonomi dari eksploitasi menuju konservasi.

Permintaan Terhadap Jasa Ekosistem

Total permintaan agregat mencapai 79 poin (13,2% dari maksimal teoritis 600), terdistribusi sebagai: jasa pengaturan 33 poin (41,8% dari permintaan total), jasa penyediaan 23 poin (29,1%), dan jasa budaya 23 poin (29,1%).

Rendahnya permintaan absolut relatif terhadap kapasitas pasokan mengindikasikan ekosistem berada dalam kondisi *underutilized* secara agregat, namun analisis disagregasi mengungkapkan heterogenitas substansial dalam keseimbangan pasokan-permintaan antar jasa individual (lihat Bagian 3.4). Jasa dengan permintaan tertinggi (skor Likert 5) meliputi: perlindungan erosi pantai (RS1), redaman gelombang (RS2), ekstraksi kayu bakar (PS5), dan nilai warisan budaya (CS6). One-way ANOVA menunjukkan perbedaan signifikan dalam pola permintaan antar enam kelompok pemangku kepentingan ($F = 12,45$, $df = 5$, $p < 0,001$), mengindikasikan heterogenitas preferensi yang perlu diakomodasi dalam strategi pengelolaan partisipatif (Reed, 2008).

Sebagaimana divisualisasikan dalam Gambar 5, profil permintaan berbeda signifikan antar kelompok. Nelayan tradisional ($n=20$) memprioritaskan jasa penyediaan perikanan (PS1-PS3) dengan skor rata-rata 4,7 dan jasa pengaturan *nursery ground* (RS7) dengan skor 4,8, mencerminkan pemahaman ekologis tradisional mengenai keterkaitan habitat-perikanan (Johannes et al., 2000). Menariknya, kelompok ini juga menunjukkan kesadaran konservasi tinggi (95% responden menyatakan kekhawatiran terhadap degradasi), mengindikasikan potensi untuk *co-management* berbasis ilmu pengetahuan lokal (*local ecological knowledge*)

sebagaimana berhasil diimplementasikan di Filipina dan Thailand (Pomeray & Rivera-Guieb, 2006).

Penebang kayu (n=5) menunjukkan ketergantungan ekonomi sangat tinggi pada PS4 dan PS5 (skor 5), dengan pendapatan Rp 40.000-70.000 per hari dari ekstraksi kayu, namun mendemonstrasikan kesadaran ekologis rendah (hanya 20% menyadari dampak regenerasi). Ini mencerminkan *poverty-environment trap* klasik dimana ketiadaan alternatif *livelihood* memaksa eksploitasi sumber daya destruktif meskipun disadari tidak berkelanjutan (Barbier, 2010; Bénédicte et al., 2016). Pemandu wisata mangrove (n=6) mendemonstrasikan orientasi konservasi holistik dengan prioritas seimbang pada jasa budaya (CS1, CS3) dan pengaturan (RS1-RS2), dengan 100% kesadaran konservasi dan perilaku *protective* terhadap zona *boardwalk* yang mengalami regenerasi alamiah (kerapatan >75% vs <50% di zona eksploitasi). Pejabat pemerintah (n=4) memprioritaskan jasa pengaturan berskala lanskap (RS1, RS2, RS4, RS6) yang mendukung kebijakan adaptasi perubahan iklim dan ketahanan pesisir, sejalan dengan prioritas nasional Indonesia dalam *Nationally Determined Contribution* (NDC) dan *National Action Plan on Climate Change Adaptation* (Boer et al., 2016).

Hasil penilaian menunjukkan permintaan terhadap jasa pengaturan sangat tinggi (41,8% dari total permintaan), mencerminkan kesadaran masyarakat akan fungsi ekologis penting yang menopang kehidupan dan ketahanan pesisir. Jasa-jasa seperti penahan abrasi pantai, penahan gelombang, regulasi kualitas air, *nursery ground*, dan penyerapan karbon mendapatkan skor tinggi dari seluruh kelompok responden, sejalan dengan temuan meta-analisis (Mukherjee et al., 2014) yang menunjukkan kesadaran tinggi masyarakat pesisir di negara berkembang terhadap fungsi perlindungan pantai (85-95% responden) dan produktivitas perikanan (75-90% responden). Kesadaran ini memberikan *social capital* yang kondusif untuk implementasi skema *co-management* dan *community-based conservation* (Ostrom, 1990; Berkes, 2009).

Permintaan terhadap jasa penyediaan (29,1%) mencerminkan ketergantungan ekonomi langsung, terutama pada tangkapan ikan (PS1: skor 4,2), kepiting bakau (PS2: skor 3,8), dan kayu bakar (PS5: skor 5,0). Ketergantungan sangat tinggi pada kayu bakar (100% rumah tangga responden menggunakan sebagai sumber energi utama) mengindikasikan fenomena *energy poverty* di wilayah ini, sesuai dengan penelitian Carrasquilla-Henao & Juanes, (2017) yang mengaitkan

ketergantungan pada biomassa tradisional dengan rumah tangga berpendapatan rendah di wilayah pesisir Amerika Latin dan Asia Tenggara. Rata-rata konsumsi kayu bakar mencapai 4-6 m³ per rumah tangga per tahun, menghasilkan total ekstraksi 8.000-12.000 m³/tahun dari populasi 2.000 rumah tangga. Volume ini jauh melampaui kapasitas regenerasi biomassa mangrove yang hanya 120-150 m³/tahun, menciptakan *resource mining* yang tidak berkelanjutan (Hutchison et al., 2014).

Sementara itu, permintaan terhadap jasa budaya (29,1% dari total) relatif rendah dalam konteks kapasitas pasokan yang tersedia (129 poin), dengan utilisasi hanya 17,8%. Nilai warisan budaya menjadi prioritas utama dengan skor 5,0, mencerminkan pentingnya mangrove dalam identitas kultural masyarakat adat Papua yang mengintegrasikan ekosistem dalam sistem kepercayaan, ritual sasi (larangan adat untuk konservasi), dan narasi kosmologi lokal (Novaczek et al., 2001). Rendahnya permintaan ekowisata (CS1: skor 2,8) bukan disebabkan oleh kurangnya minat intrinsik masyarakat, melainkan karena hambatan struktural multidimensi yang mencakup: (1) keterbatasan infrastruktur dasar (akses jalan, dermaga, signage), (2) rendahnya kapasitas masyarakat dalam manajemen wisata berkelanjutan (hanya 15% responden memiliki pengalaman sektor jasa), (3) ketiadaan modal untuk investasi awal, dan (4) keterbatasan pemasaran dan branding destinasi (Spalding et al., 2014; Friess, 2016). Mengatasi hambatan ini memerlukan intervensi multisektoral yang mengintegrasikan pengembangan infrastruktur, *capacity building*, akses modal, dan strategi *destination marketing*.

Analisis Ketersediaan Jasa Ekosistem

Secara keseluruhan, ketersediaan menunjukkan surplus agregat +216 poin (73,2% dari kapasitas pasokan), mengindikasikan *underutilization* signifikan pada tingkat sistem. Namun, analisis disagregasi mengungkapkan ketidakseimbangan kritis pada jasa-jasa spesifik dengan heterogenitas substansial dalam keseimbangan pasokan-permintaan. Jasa budaya menunjukkan surplus sangat besar (+106 poin; 82% kapasitas tidak termanfaatkan), jasa pengaturan menunjukkan surplus besar (+74 poin; 69% kapasitas tersedia), sementara jasa penyediaan hanya menunjukkan surplus marginal (+36 poin; 61% kapasitas tersedia) dengan dua jasa mengalami defisit aktual yang mengancam keberlanjutan ekosistem.

Defisit kritis teridentifikasi pada dua jasa penyediaan kayu yang mengalami eksploitasi

melebihi kapasitas regenerasi: (1) Kayu konstruksi (PS4): ekstraksi aktual 200-300 m³/tahun versus kapasitas regenerasi biomassa 80-100 m³/tahun, menghasilkan defisit bersih 100-220 m³/tahun (-52,6% hingga -68,8% dari kapasitas); (2) Kayu bakar dan arang (PS5): ekstraksi 400-660 m³/tahun versus regenerasi 120-150 m³/tahun, menghasilkan defisit 250-540 m³/tahun (-67,5% hingga -81,8% dari kapasitas). Defisit gabungan 350-710 m³/tahun setara dengan deplesi biomassa *standing stock* 7-14% per tahun, mendorong degradasi progresif pada laju 15-20 ha/tahun (3-4% dari total luasan per tahun), menurunkan kerapatan kanopi dari 93,95% pada tahun 2015 menjadi 50,51% pada tahun 2025 berdasarkan analisis citra satelit Sentinel-2 multitemporal.

Sebagaimana ditampilkan dalam Gambar 3, matriks ketersediaan mengungkapkan pola defisit terkonsentrasi pada jasa penyediaan dengan sumber struktural batang, sementara surplus dominan pada jasa budaya dan pengaturan. Visualisasi ini mengidentifikasi PS4 dan PS5 sebagai *critical services* yang memerlukan intervensi manajemen prioritas untuk mencegah kolaps ekosistem (Carpenter et al., 2009).

Jasa mendekati defisit (*near-deficit*; ketersediaan <+2 poin atau <20% kapasitas pasokan) meliputi: (1) Tangkapan ikan (PS1): penurunan CPUE (catch per unit effort) 25-30% selama 5 tahun terakhir (2019-2024), berkorelasi kuat negatif dengan degradasi nursery ground ($r = -0,78$, $p < 0,01$) berdasarkan analisis time series; (2) Produktivitas kepiting bakau (PS2): penurunan hasil tangkapan 25% selama periode sama dengan penurunan ukuran rata-rata dari 650 g menjadi 480 g per individu, mengindikasikan *growth overfishing* dan degradasi habitat kompleks akar (Le Vay, 2001); (3) Regulasi kualitas air (RS6): beban polusi dari aktivitas antropogenik (limbah domestik, erosi sedimen dari land clearing) melebihi kapasitas biofiltrasi substrat mangrove di beberapa lokasi, terutama zona dekat pemukiman padat (>100 rumah/ha), mengancam kesehatan masyarakat dan produktivitas perikanan melalui eutrofikasi dan akumulasi patogen (Tam & Wong, 2000).

Penurunan CPUE perikanan konsisten dengan teori *recruitment overfishing* dimana degradasi *habitat nursery* menurunkan *survival* juvenil, sehingga mengurangi rekrutmen ke populasi adult (Hilborn & Walters, 1992). Model regresi menunjukkan kehilangan 1 ha mangrove berkorelasi dengan penurunan tangkapan ikan 20-50 kg/tahun per nelayan (Aburto-Oropeza et al., 2008), yang pada skala degradasi 15-20 ha/tahun dapat menyebabkan kerugian ekonomi perikanan Rp 150-350 juta

per tahun untuk komunitas 2.000 rumah tangga.

Ketidakseimbangan Fundamental Pasokan-Permintaan

Temuan kami mengungkapkan pola paradoks dimana jasa dengan kapasitas pasokan tertinggi (budaya: 43,7% dari total kapasitas) paling sedikit dimanfaatkan (utilisasi 6-10% dari potensi; surplus +106 poin), sementara jasa dengan kapasitas terendah (penyediaan: 20% dari total kapasitas) mengalami eksploitasi berlebih (ekstraksi kayu pada 250-450% kapasitas regenerasi; defisit -2 hingga -4 poin). Ketidaksesuaian ini menciptakan *ecological debt* yang mengancam keberlanjutan jangka panjang ekosistem, konsisten dengan teori *ecological overshoot* dimana pemanfaatan melampaui kapasitas regenerasi menyebabkan degradasi progresif menuju potensi kolaps (Costanza et al., 2014; Wackernagel et al., 2002).

Ketidakseimbangan ini berakar pada kegagalan pasar (*market failure*) yang sistematis dalam valuasi ekosistem. Jasa penyediaan memiliki nilai pasar eksplisit yang diperdagangkan (kayu: Rp 200.000-350.000/m³; ikan: Rp 25.000-60.000/kg), menciptakan insentif ekonomi langsung untuk ekstraksi. Sebaliknya, jasa pengaturan dan budaya bersifat *public goods* dan *non-market values* tanpa mekanisme kompensasi, sehingga nilai ekonominya tidak terinternalisasi dalam keputusan pengelolaan (Costanza et al., 1997; Daily et al., 2009). Ini menghasilkan *tragedy of the commons* (Hardin, 1968) dimana aktor rasional secara individual akan *overexploitation* sumber daya bersama karena menginternalisasi manfaat privat namun mengeksternalisasi biaya sosial-ekologis.

Solusi memerlukan reformasi kelembagaan untuk internalisasi eksternalitas melalui instrumen ekonomi seperti *Payments for Ecosystem Services* (PES), *conservation concessions*, atau rezim kepemilikan bersama yang jelas (Ostrom, 1990; (Engel et al., 2008)). Pengalaman sukses dari Costa Rica menunjukkan PES untuk konservasi hutan dapat mengurangi deforestasi 20-60% sambil meningkatkan kesejahteraan masyarakat lokal (Porras et al., 2013).

Efek Berantai Degradasi Struktural Efek Berantai Degradasi Struktural

Hilangnya integritas sistem perakaran melalui pemanenan kayu memicu efek berantai (*cascade effects*) pada berbagai jasa ekosistem melalui keterkaitan struktural-fungsional yang kompleks. Penebangan selektif pohon besar (diameter setinggi dada >20 cm) yang diprioritaskan untuk

nilai kayu tinggi mengurangi produksi propagul 40-60% karena pohon dewasa adalah kontributor utama output reproduktif (Saenger, 2002). Penurunan input propagul menghambat regenerasi alami, memperpanjang waktu recovery dari 5-8 tahun menjadi 15-25 tahun, dan menggeser komposisi spesies menuju pioneer toleran gangguan dengan biomassa rendah (Lewis, 2005).

Degradasi ini menciptakan umpan balik positif (*positive feedback loop*) yang mempercepat kolaps ekosistem: pemanenan kayu → hilangnya kompleksitas perakaran → penurunan fungsi nursery ground → reduksi produktivitas perikanan ($r = -0,78$, $p < 0,01$) → tekanan ekonomi pada rumah tangga nelayan → diversifikasi livelihood menuju penebangan kayu → intensifikasi pemanenan. Perangkap kemiskinan-lingkungan (*poverty-environment trap*) semacam ini telah terdokumentasi dengan baik dalam literatur ekonomi ekologi (Barbier, 2010; Barrett et al., 2011), dimana kemiskinan mendorong eksploitasi berlebih sumber daya yang pada gilirannya memperdalam kemiskinan melalui degradasi basis sumber daya yang menopang kehidupan.

Sebagaimana diilustrasikan dalam Gambar 4, diagram alir degradasi mengungkapkan interkoneksi kompleks antara eksploitasi kayu, hilangnya struktur ekosistem, penurunan multiple jasa, dan umpan balik sosio-ekonomi yang memperkuat degradasi. Titik masuk intervensi potensial teridentifikasi pada beberapa leverage point dalam sistem: (1) substitusi energi dengan LPG atau biogas untuk memutus ketergantungan kayu bakar, (2) pengembangan ekowisata sebagai *livelihood* alternatif, (3) PES untuk karbon biru sebagai kompensasi konservasi, dan (4) penguatan kelembagaan lokal untuk monitoring dan *enforcement*.

Degradasi sistem perakaran juga mengurangi efektivitas perlindungan pantai secara eksponensial. Penurunan kerapatan kanopi dari 93,95% menjadi 50,51% (penurunan 46,2%) berkoresponden dengan reduksi 40-60% dalam kapasitas redaman gelombang berdasarkan pemodelan hidrodinamik (McIvor et al., 2012; Horstman et al., 2014), memaparkan sekitar 2.000 rumah tangga pesisir pada peningkatan risiko erosi (laju mundurnya garis pantai meningkat dari $<0,5$ m/tahun menjadi 2-5 m/tahun) dan gelombang badai. Kerugian ekonomi dari degradasi jasa perlindungan sangat substansial; meta-analisis Barbier (2016) memperkirakan kehilangan 1 ha mangrove meningkatkan risiko banjir pesisir 15-20% dan kerusakan ekonomi tahunan USD 10.000-50.000 per ha (setara Rp 140-700 juta per ha per tahun dengan kurs Rp 14.000/USD) melalui kombinasi

kerusakan properti, kehilangan produktivitas lahan pertanian, dan biaya kesehatan. Dalam konteks perubahan iklim dengan proyeksi peningkatan intensitas badai tropis dan kenaikan muka air laut 0,5-1,0 m pada tahun 2100 untuk kawasan Indo-Pasifik (IPCC, 2021), degradasi mangrove mengurangi kapasitas adaptasi alamiah (*natural adaptive capacity*) dan meningkatkan kerentanan masyarakat pesisir terhadap *climate hazards*. Konservasi dan restorasi mangrove merupakan strategi *ecosystem-based adaptation* yang *cost-effective* dengan rasio manfaat-biaya 3-5:1 dibandingkan infrastruktur abu-abu seperti tanggul beton (Menéndez et al., 2020; Beck et al., 2018).

Implikasi terhadap Kebijakan Nasional & Lokal

Temuan penelitian mengenai dinamika jasa ekosistem mangrove di Kota Sorong ini memberikan landasan saintifik yang krusial untuk mereorientasi strategi pengelolaan wilayah pesisir, baik pada level kebijakan nasional maupun implementasi di tingkat lokal:

a. Tingkat Nasional: Kontribusi terhadap NDC dan Target Restorasi

Degradasi 15-20 ha/tahun di Kota Sorong setara dengan emisi 13.725-18.300 ton CO₂/tahun (menggunakan emission factor 915 ton CO₂/ha untuk mangrove Papua; Donato et al., 2011), yang bertentangan dengan komitmen Indonesia dalam NDC untuk mengurangi emisi 29% (*unconditional*) atau 41% (*conditional*) pada 2030. Lebih lanjut, target pemerintah untuk merestorasi 600.000 hektar mangrove (Perpres 73/2012) akan sulit tercapai jika degradasi akibat ekstraksi kayu tidak diatasi di tingkat tapak. Oleh sebab itu kebijakan yang perlu dilakukan antar : (1). Integrasi skema REDD+ (*Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation*) untuk mangrove dengan mekanisme *blue carbon offset* yang memungkinkan kompensasi finansial bagi komunitas lokal yang menghentikan ekstraksi kayu (potensi Rp 1,09-3,85 miliar/tahun untuk Kota Sorong), (2). Revisi Peraturan Menteri Kelautan dan Perikanan No. 17/2021 tentang Pengelolaan Ekosistem Mangrove untuk memperkuat insentif ekonomi berbasis jasa non-ekstraktif (ekowisata, karbon) dan disinsentif untuk ekstraksi destruktif, (3). Alokasi dana khusus dalam program transisi energi nasional (misalnya, subsidi LPG atau biogas) yang diprioritaskan untuk komunitas pesisir bergantung kayu bakar mangrove

b. Tingkat Provinsi: Harmonisasi RZWP3K dengan Konservasi

Rencana Zonasi Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil (RZWP3K) Papua Barat Daya saat

ini mengalokasikan kawasan mangrove Sorong sebagai zona konservasi perikanan, namun tidak mengakomodasi ketergantungan energi masyarakat atau potensi ekowisata. Kebijakan yang perlu diambil antara lain: (1) Revisi RZWP3K untuk menambahkan sub-zona ekowisata mangrove dengan kapasitas maksimum 8.000-15.000 pengunjung/tahun (berdasarkan analisis *carrying capacity*) yang menyediakan alternatif *livelihood* bagi 50-100 penebang kayu aktif (2) Integrasi mangrove Sorong dalam skema Kesatuan Pengelolaan Hutan (KPH) provinsi dengan status Hutan Konservasi yang memungkinkan *co-management* antara pemerintah dan masyarakat adat (3) Pengembangan *payment for ecosystem services* (PES) *scheme* tingkat provinsi yang mendistribusikan *revenue* dari sektor yang diuntungkan oleh jasa pengaturan mangrove (seperti pelabuhan, perikanan komersial) kepada komunitas konservasi.

c. Tingkat Kota: Penguatan Kelembagaan Lokal

Dinas Kelautan dan Perikanan Kota Sorong saat ini memiliki keterbatasan kapasitas dalam monitoring dan *enforcement* regulasi ekstraksi kayu mangrove. Sehingga perlu dilakukan (1) Pembentukan Forum Pengelolaan Mangrove Terpadu (FPMT) yang melibatkan pemerintah, masyarakat adat, akademisi, dan sektor swasta dengan mandate untuk: monitoring partisipatif degradasi menggunakan teknologi drone dan *citizen science*, mediasi konflik pemanfaatan, dan alokasi kuota ekstraksi berkelanjutan berbasis *scientific assessment*. (2) Integrasi target konservasi mangrove dalam Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah (RPJMD) 2024-2029 dengan indikator kinerja terukur: reduksi degradasi dari 15-20 ha/tahun menjadi <5 ha/tahun pada 2027, peningkatan kerapatan kanopi dari 50,51% menjadi >70% pada 2029, diversifikasi *livelihood* dengan minimal 30% penebang kayu beralih ke ekowisata/perikanan berkelanjutan pada 2026. (3) Alokasi minimal 5% Dana Alokasi Khusus (DAK) bidang kelautan dan perikanan untuk program rehabilitasi mangrove dan pengembangan alternatif energi di komunitas pesisir

KESIMPULAN

Penelitian ini mengungkapkan krisis ekologis di ekosistem mangrove Kota Sorong yang disebabkan oleh ketidaksesuaian fundamental antara kapasitas pasokan dan pola pemanfaatan jasa ekosistem. Tanpa intervensi segera, sistem ini menghadapi risiko kolaps dalam 15-20 tahun ke depan. Temuan utama penelitian adalah:

1. Paradoks Pemanfaatan Jasa Ekosistem

Dari 20 jasa ekosistem teridentifikasi, terjadi disparitas ekstrem dalam pemanfaatan: jasa budaya yang mendominasi kapasitas pasokan (43,7%) hanya dimanfaatkan 6-10% dari potensinya, sementara jasa penyediaan dengan kapasitas terendah (20%) justru dieksploitasi 3-4 kali melebihi kapasitas regenerasinya.

2. Defisit Ekologis Kritis pada Ekstraksi Kayu

Ekstraksi kayu mencapai 600-960 m³/tahun, jauh melampaui kapasitas regenerasi alami sebesar 200-250 m³/tahun. Defisit 350-710 m³/tahun ini memicu degradasi 15-20 ha/tahun dan penurunan kerapatan kanopi drastis dari 93,95% (2015) menjadi 50,51% (2025), menandakan degradasi ekosistem yang mengkhawatirkan.

3. Kemiskinan Energi sebagai Pendorong Utama Degradasi

Sebanyak 70-100 rumah tangga bergantung sepenuhnya pada kayu bakar mangrove (400-660 m³/tahun atau 35-52% dari total ekstraksi) akibat keterbatasan akses terhadap sumber energi modern. Ketergantungan ini menciptakan siklus degradasi yang berkelanjutan.

4. Potensi Ekonomi Jasa Non-Ekstraktif Terabaikan

Nilai ekonomi jasa karbon mencapai Rp 1,9-10,3 miliar/tahun dari sekuestrasi 27.500-73.333 ton CO₂/tahun, sementara potensi ekowisata dapat ditingkatkan 10-16 kali lipat dari Rp 32-57 juta menjadi Rp 320-912 juta/tahun. Kedua jasa ini hampir sepenuhnya tidak termanfaatkan meskipun memiliki kapasitas tinggi dan dampak ekologis minimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Aburto-Oropeza, O., Ezcurra, E., Danemann, G., Valdez, V., Murray, J., & Sala, E. (2008). Mangroves in the Gulf of California increase fishery yields. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(30), 10456–10459. <https://doi.org/10.1073/pnas.0804601105>
- Alongi, D. M. (2012). Carbon sequestration in mangrove forests. *Carbon Management*, 3(3), 313–322. <https://doi.org/10.4155/cmt.12.20>
- Alongi, D. M. (2014). Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science*, 6, 195–219. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010213-135020>
- Bagstad, K. J., Semmens, D. J., Waage, S., & Winthrop, R. (2013). A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation. *Ecosystem Services*, 5, 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.05.001>

- doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.07.004
- Bagstad, K. J., Villa, F., Batker, D., Harrison-Cox, J., Voigt, B., & Johnson, G. W. (2014). From theoretical to actual ecosystem services: Mapping beneficiaries and spatial flows in ecosystem service assessments. *Ecology and Society*, 19(2), 64. <https://doi.org/10.5751/ES-06523-190264>
- Balmford, A., Green, J. M. H., Anderson, M., Beresford, J., Huang, C., Naidoo, R., ... Manica, A. (2015). Walk on the wild side: Estimating the global magnitude of visits to protected areas. *PLOS Biology*, 13(2), e1002074. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002074>
- Barbier, E. B. (2010). Poverty, development, and environment. *Environment and Development Economics*, 15(6), 635–660. <https://doi.org/10.1017/S1355770X1000032X>
- Barbier, E. B. (2016). The protective service of mangrove ecosystems: A review of valuation methods. *Marine Pollution Bulletin*, 109(2), 676–681. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.01.033>
- Beck, M. W., Losada, I. J., Menéndez, P., Reguero, B. G., Díaz-Simal, P., & Fernández, F. (2018). The global flood protection savings provided by coral reefs. *Nature Communications*, 9, 2186. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04568-z>
- Béné, C., Newsham, A., Davies, M., Ulrichs, M., & Godfrey-Wood, R. (2016). Resilience, poverty and development. *World Development*, 87, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2016.06.002>
- Burkhard, B., Kroll, F., Nedkov, S., & Müller, F. (2012). Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 21, 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.019>
- Carrasquilla-Henao, M., & Juanes, F. (2017). Mangroves enhance local fisheries catches: A global meta-analysis. *Fish and Fisheries*, 18(1), 79–93. <https://doi.org/10.1111/faf.12168>
- Carpenter, S. R., Mooney, H. A., Agard, J., et al. (2009). Science for managing ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(5), 1305–1312. <https://doi.org/10.1073/pnas.0808779106>
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., et al. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 253–260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., et al. (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>
- Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2017). *Designing and Conducting Mixed Methods Research* (3rd ed.). Sage. <https://doi.org/10.4135/9781483344379>
- Daily, G. C., Polasky, S., Goldstein, J., et al. (2009). Ecosystem services in decision making. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(28), 11752–11757. <https://doi.org/10.1073/pnas.0901023106>
- Das, S., & Crépin, A.-S. (2013). Mangroves can provide protection against wind damage during storms. *American Economic Review*, 103(3), 1–6. <https://doi.org/10.1257/aer.103.3.1>
- Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarto, D., et al. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4, 293–297. <https://doi.org/10.1038/ngeo1123>
- Ellison, A. M., & Farnsworth, E. J. (1996). Anthropogenic disturbance of Caribbean mangrove ecosystems. *Conservation Biology*, 10(4), 1050–1059. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041050.x>
- Engel, S., Pagiola, S., & Wunder, S. (2008). Designing payments for environmental services. *Ecological Economics*, 65(4), 663–674. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.07.011>
- Friess, D. A., Rogers, K., Lovelock, C. E., et al. (2020). The state of the world's mangrove forests. *Annual Review of Environment and Resources*, 45, 89–115. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220-012234>
- Giri, C., Ochieng, E., Tieszen, L. L., et al. (2011). Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 154–159. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00584.x>
- Goldberg, L., Lagomasino, D., Thomas, N., & Fatoyinbo, T. (2020). Global declines in human-driven mangrove loss. *Global Change Biology*, 26(10), 5844–5855. <https://doi.org/10.1111/gcb.15275>
- Haines-Young, R., & Potschin, M. (2010). The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being. *Ecology*, 91(1), 110–139. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511750458.007>
- Haines-Young, R., & Potschin, M. (2018). *Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1*. <https://doi.org/10.3897/oneeco.3.e27108>
- Hardin, G. (1968). *The tragedy of the commons*.

- Science, 162(3859), 1243–1248.<https://doi.org/10.1126/science.162.3859.1243>
- Howard, J., Sutton-Grier, A., Herr, D., et al. (2017). Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15(1), 42–50.<https://doi.org/10.1002/fee.1451>
- Jacobs, S., Burkhard, B., Van Daele, T., et al. (2015). 'The matrix reloaded': A review of ecosystem service assessment. *Ecological Economics*, 120, 158–172.<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.10.023>
- Kathiresan, K., & Bingham, B. L. (2001). Biology of mangroves and mangrove ecosystems. *Advances in Marine Biology*, 40, 81–251.[https://doi.org/10.1016/S0065-2881\(01\)40003-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2881(01)40003-4)
- Krauss, K. W., Lovelock, C. E., McKee, K. L., et al. (2008). Environmental drivers in mangrove establishment. *Botanical Review*, 74, 1–33.<https://doi.org/10.1007/s12229-008-9001-4>
- Maes, J., Teller, A., Erhard, M., et al. (2016). Mapping and assessment of ecosystems and their services. Publications Office of the European Union.<https://doi.org/10.2779/752728>
- Mclvor, A. L., Möller, I., Spencer, T., & Spalding, M. (2012). Reduction of wind and swell waves by mangroves. *Natural Coastal Protection Series*.<https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2012.NCP.1.en>
- Menéndez, P., Losada, I. J., Beck, M. W., et al. (2020). The global flood protection benefits of mangroves. *Scientific Reports*, 10, 4404.<https://doi.org/10.1038/s41598-020-61136-6>
- Nagelkerken, I., Blaber, S. J. M., Bouillon, S., et al. (2008). The habitat function of mangroves. *Aquatic Botany*, 89(2), 155–185.<https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.12.007>
- Ostrom, E. (1990). *Governing the Commons*. Cambridge University Press.<https://doi.org/10.1017/CBO9780511807763>