

Analisis Skenario Multi-Dimensi untuk Pengelolaan Ekosistem Terumbu Karang Berkelanjutan di Pemuteran, Bali

Rainey Windayati^{1*} dan Gusti Ayu Made Mirah Rismayanti²

¹Program Studi Pendidikan Geografi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jember
Jl. Kalimantan No. 37, Kampus Tegalboto, Sumbersari, Jember, 68121 Indonesia

²Yayasan Bendega
Jl. Waturenggong Gg. XX, No. 09, Banjar Sasih, Panjer, Denpasar, Bali, 80225 Indonesia
Corresponding author, e-mail: rainey@unej.ac.id

ABSTRAK: Ekosistem terumbu karang di Pemuteran menghadapi tekanan akibat meningkatnya kegiatan wisata bahari dan pengaruh lingkungan pesisir, sehingga diperlukan strategi pengelolaan yang mampu menjaga keseimbangan antara pemanfaatan dan keberlanjutannya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi ekologi terumbu karang, kesesuaian dan daya dukung wisata, nilai ekonomi jasa ekosistem, serta merumuskan skenario pengelolaan berkelanjutan berbasis model dinamik terpadu. Metode penelitian meliputi survei biofisik terumbu karang, analisis kualitas perairan dan oseanografi, analisis kesesuaian dan daya dukung wisata, valuasi ekonomi jasa ekosistem, serta pengembangan model dinamik yang mengintegrasikan sub-model ekologi, sosial, dan ekonomi melalui skenario aktual dan alternatif yang kemudian diverifikasi dan divalidasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi ekosistem terumbu karang di Pemuteran relatif baik, khususnya pada lokasi rehabilitasi, dengan total valuasi ekonomi jasa ekosistem mencapai Rp167.691.703.964 dengan nilai ekonomi wisata sebesar Rp144.627.528.000, namun beberapa titik wisata bawah air telah melampaui daya dukung ekologisnya. Skenario aktual menunjukkan kecenderungan penurunan tutupan karang dan potensi perikanan meskipun nilai ekonomi wisata meningkat, sedangkan skenario alternatif yang menerapkan restorasi dan rehabilitasi ekosistem terumbu karang, pengendalian jumlah wisatawan, dan peningkatan kualitas perairan mampu meningkatkan tutupan karang, potensi perikanan, kesempatan kerja, serta nilai ekonomi kawasan secara signifikan. Penelitian ini menegaskan bahwa pengelolaan ekosistem terumbu karang di Pemuteran perlu dilaksanakan secara terintegrasi melalui pendekatan multi-dimensi yang adaptif dan menyeluruh, dengan penguatan peran kelembagaan lokal serta penerapan prinsip pengelolaan berbasis ekosistem yang menempatkan dimensi ekologi sebagai pijakan utama, sekaligus mengharmonikan aspek sosial dan ekonomi, sehingga kelestarian ekosistem dan keberlanjutan manfaat wisata bahari dapat terjaga dalam jangka panjang.

Kata kunci: Terumbu karang; Pemuteran; Skenario multi-dimensi; Sistem dinamik.

Multi-Dimensional Scenario Analysis for Sustainable Management of Coral Reef Ecosystem in Pemuteran, Bali

ABSTRACT: *The coral reef ecosystem in Pemuteran is facing pressure from the growth of marine tourism activities and coastal environmental influences, highlighting the need for management strategies that can balance utilization and sustainability. This study aims to analyze the ecological condition of coral reefs, tourism suitability and carrying capacity, the economic value of ecosystem services, and to formulate sustainable management scenarios based on an integrated dynamic modeling approach. The research methods include bio-physical surveys of coral reefs, analyses of water quality and oceanographic conditions, assessments of tourism suitability and carrying capacity, valuation of ecosystem services, and the development of a dynamic model integrating ecological, social, and economic sub-models through actual and alternative scenarios that were subsequently verified and validated. The results indicate that the condition of the coral reef ecosystem in Pemuteran is relatively good, particularly at rehabilitation sites, with a total ecosystem service valuation reaching IDR 167,691,703,964 and a tourism economic value of IDR*

144,627,528,000. However, several underwater tourism sites have exceeded their ecological carrying capacity. The actual scenario shows a tendency toward declining coral cover and fisheries potential despite increasing tourism economic value, whereas the alternative scenario which incorporating coral reef restoration and rehabilitation, control of tourist numbers, and improvements in water quality, demonstrates a significant increase in coral cover, fisheries potential, employment opportunities, and the overall economic value of the area. This study confirms that coral reef ecosystem management in Pemuteran should be implemented in an integrated manner through an adaptive and comprehensive multi-dimensional approach, strengthened by robust local institutional involvement and the application of ecosystem-based management principles that prioritize ecological dimensions while harmonizing social and economic aspects, thereby ensuring long-term ecosystem conservation and sustainable benefits from marine tourism.

Keywords: Coral reefs; Pemuteran; Multi-dimensional scenarios; System dynamics.

PENDAHULUAN

Terumbu karang merupakan ekosistem dengan keanekaragaman hayati dan tingkat produktivitas yang sangat tinggi, berfungsi sebagai habitat biota laut, kawasan pemijahan dan pembesaran ikan, penahan abrasi, sekaligus penyedia berbagai jasa ekowisata. Terumbu karang memiliki peran penting dalam kehidupan masyarakat pesisir serta menjadi aset yang sangat bernilai dari tingkat lokal hingga mancanegara. Produktivitasnya mendukung mata pencarian dan ketahanan pangan lebih dari setengah miliar penduduk di lebih dari seratus negara, dan secara ekonomi merupakan aset bernilai triliunan dolar (Obura *et al.*, 2019). Namun, berbagai tekanan termasuk perubahan iklim global, peningkatan suhu laut, sedimentasi berlebih, pencemaran, dan aktivitas manusia yang intensif telah menyebabkan penurunan kualitas terumbu karang secara signifikan (IPCC, 2023; Liao & Chen, 2025). Kondisi ini juga terjadi pada kawasan pesisir Bali bagian utara, termasuk Desa Pemuteran, yang secara historis pernah mengalami kerusakan ekosistem terumbu karang yang masif akibat penangkapan ikan destruktif sebelum adanya upaya rehabilitasi melalui teknologi *Biorock* pada awal tahun 2000 (Dunning, 2015). Meningkatnya aktivitas wisata bahari kemudian membawa tantangan baru dalam menjaga keberlanjutan ekosistem.

Pemuteran merupakan bagian dari Kawasan Konservasi Perairan (KKP) Buleleng Barat, yang memiliki potensi ekosistem terumbu karang yang tinggi serta menjadi destinasi wisata bahari unggulan untuk kegiatan menyelam dan *snorkeling*. Penelitian Windayati *et al.* (2022) menjelaskan bahwa wilayah KKP Buleleng Barat menyediakan jasa ekosistem yang sangat penting, mulai dari jasa penyedia (*provisioning service*), pengaturan (*regulating service*), hingga budaya (*cultural services*) yang mendukung aktivitas wisata dan ekonomi lokal. Namun, tingginya tekanan wisata bahari dapat melampaui daya dukung lingkungan apabila tidak dikelola secara terpadu. Sebelumnya, Windayati *et al.* (2020) menunjukkan bahwa potensi, kesesuaian, dan daya dukung Kawasan ekosistem terumbu karang di KKP Buleleng Barat sangat bervariasi antar lokasi, sehingga pengelolaan berbasis zona dan data biofisik diperlukan untuk menjaga keberlanjutan ekosistem.

Selain aspek ekologis, pengelolaan kawasan Pemuteran juga dipengaruhi oleh aspek spasial, sosial, dan ekonomi kawasan. Marfai *et al.* (2020) menjelaskan bahwa pemetaan resort selam dan analisis jaringan pariwisata berperan penting dalam memahami pola pemanfaatan ruang, distribusi aktivitas wisata, serta risiko tekanan ekologi di pesisir Pemuteran. Aktivitas ekowisata yang semakin berkembang juga dipetakan oleh Mutaqin *et al.* (2019), yang menekankan perlunya pemahaman dinamika ruang dan waktu dalam pengembangan ekowisata berbasis konservasi. Dalam konteks ini, berbagai penelitian terdahulu menggarisbawahi bahwa keberlanjutan pengelolaan terumbu karang tidak dapat dipisahkan dari interaksi kompleks antara aspek ekologi, sosial dan ekonomi masyarakat, kelembagaan, serta dinamika pembangunan wisata bahari.

Salah satu urgensi di Pemuteran adalah bagaimana merancang skenario pengelolaan yang mampu menyeimbangkan pertumbuhan wisata dengan kelestarian ekosistem terumbu karang. Tantangan tersebut mencakup pertanyaan mengenai kemampuan daya dukung kawasan dalam

mengakomodasi wisatawan, tingkat kesesuaian lokasi untuk aktivitas wisata bahari, nilai ekonomi jasa ekosistem yang dihasilkan, serta bagaimana seluruh aspek tersebut dapat diintegrasikan dalam sebuah model multi-dimensi yang komprehensif. Dalam kerangka ini, pendekatan sistem dinamik sebagaimana dijelaskan oleh Forrester (1999), Casagrandi & Rinaldi (2002) serta Hafezi *et al.* (2021) menjadi relevan, karena mampu mensimulasikan interaksi umpan balik antara ekologi, sosial, dan ekonomi untuk memprediksi dampak jangka panjang suatu kebijakan pengelolaan.

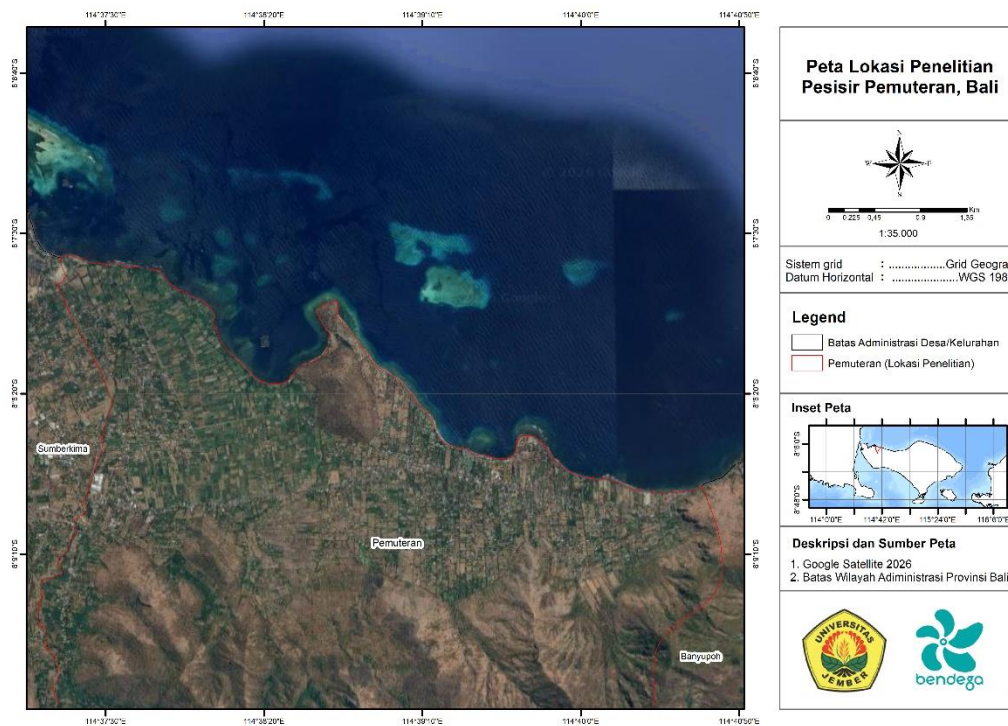
Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merumuskan pendekatan pengelolaan yang integratif dan adaptif melalui analisis potensi dan kondisi ekologi terumbu karang, daya dukung dan kesesuaian wisata, valuasi ekonomi jasa ekosistem, serta pemodelan skenario pengelolaan yang mempertimbangkan dimensi ekologi–sosial–ekonomi secara bersamaan. Dengan menggabungkan temuan penelitian sebelumnya serta kondisi biofisik dan sosial ekonomi di Pemuteran, penelitian ini berupaya menghasilkan skenario pengelolaan yang tidak hanya efektif dalam menjaga keberlanjutan ekosistem, tetapi juga mendukung pertumbuhan ekonomi lokal dan peningkatan kesejahteraan masyarakat, sehingga dapat menjadi dasar pengambilan keputusan dan pengembangan strategi konservasi serta wisata bahari yang berkelanjutan di Pemuteran dan KKP Buleleng Barat. Berbeda dengan Windayati *et al.* (2020; 2022) yang berfokus pada analisis potensi, kesesuaian, daya dukung, dan valuasi jasa ekosistem secara deskriptif dan spasial maupun penelitian Wahyudin *et al.* (2025) yang berfokus pada model dan kebijakan, penelitian ini menempatkan sistem dinamik sebagai kerangka analisis utama dengan mengintegrasikan seluruh komponen tersebut ke dalam model simulasi yang mampu menggambarkan hubungan sebab-akibat dan umpan balik antarvariabel secara temporal, serta memproyeksikan dampak kebijakan melalui skenario aktual dan alternatif secara kuantitatif dan jangka panjang.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini dilaksanakan pada ekosistem terumbu karang Pemuteran, yang terletak di Kecamatan Gerokgak, Kabupaten Buleleng, Provinsi Bali, tepatnya di pesisir utara bagian barat laut Pulau Bali. Lokasinya berada pada koordinat 8°09'–8°12' Lintang Selatan dan 114°38'–114°42', yang berbatasan langsung dengan Laut Bali (Gambar 1). Pemilihan lokasi didasarkan pada tingginya potensi ekowisata, adanya teknologi rehabilitasi *Biorock*, serta keragaman tekanan antropogenik. Pengumpulan data dilakukan dengan pembagian waktu antara survei ekologi, sosial-ekonomi, serta periode validasi data spasial. Variasi kondisi musim juga dipertimbangkan untuk memperoleh gambaran komprehensif mengenai dinamika ekosistem dan intensitas wisata.

Hasil penelitian ini adalah rancangan analisis multi-dimensi yang mengintegrasikan aspek ekologi, sosial dan ekonomi untuk merumuskan skenario pengelolaan ekosistem terumbu karang berkelanjutan di Pemuteran yang sesuai dengan diagram alur penelitian. Pendekatan ini didasarkan pada gabungan analisis biofisik terumbu karang, Indeks Kesesuaian Wilayah (IKW) dan Daya Dukung Wilayah (DDW) untuk wisata bahari), valuasi ekonomi jasa ekosistem (*Travel Cost Method*, *Replacement Cost Method*, *Contingency Valuation Method*), sebagai dasar untuk optimalisasi pengelolaan ekosistem terumbu karang. Selanjutnya, pemodelan dinamik dilakukan untuk mensimulasikan skenario pengelolaan dalam jangka panjang. Pemodelan dikembangkan menggunakan kerangka sistem dinamik berdasarkan konsep umpan balik (*feedback loop*), stok–aliran (*stock–flow*), dan hubungan kausal yang dikemukakan oleh Forrester (1999), serta diadaptasi untuk ekosistem pesisir sebagaimana dilakukan Casagrandi & Rinaldi (2002) dalam model ekowisata dan lingkungan. Variabel utama yang dianalisis meliputi kondisi tutupan karang, intensitas wisata, tingkat pemanfaatan jasa ekosistem, persepsi masyarakat, dan kapasitas kelembagaan.

Pengumpulan data dilakukan melalui kombinasi survei lapangan, penginderaan jauh, kuesioner, wawancara mendalam, serta studi dokumentasi. Data ekologi meliputi tutupan karang hidup, struktur komunitas karang, dan kondisi biofisik perairan, Data spasial terkait lokasi wisata bahari, resort selam, dan zona penggunaan ruang diperoleh dari interpretasi citra satelit serta pemetaan GPS sebagaimana diterapkan pada penelitian Mutaqin *et al.* (2019). Data sosial-ekonomi diperoleh melalui kuesioner mengenai persepsi wisatawan, preferensi aktivitas wisata, *willingness to pay*, serta wawancara dengan pengelola wisata dan masyarakat lokal. Untuk menghitung nilai ekonomi jasa ekosistem, penelitian menggunakan pendekatan *Total*



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Economic Value (TEV) yang mencakup *direct use value*, *indirect use value*, *option value*, *existence value*, dan *bequest value* sesuai metode Cesar dan Chong (2004) serta diterapkan dalam studi Windayati *et al.* (2022).

Seluruh data kuantitatif, spasial, dan temporal kemudian digunakan untuk membangun model sistem dinamik melalui perangkat lunak STELLA yang terdiri dari model konseptual dan skenario model (aktual dan alternatif). Selanjutnya, model diuji melalui validasi struktur dan perilaku sebelum digunakan untuk menyusun skenario pengelolaan. Analisis skenario dilakukan dengan mensimulasikan perubahan variabel kunci untuk melihat dampak kebijakan terhadap kondisi tutupan karang, pendapatan wisata, dan kesejahteraan masyarakat dalam kurun waktu 10–20 tahun mendatang. Hasil simulasi kemudian diinterpretasikan untuk merumuskan alternatif kebijakan pengelolaan yang paling efektif dan berkelanjutan. Pendekatan integratif ini memungkinkan pemahaman yang komprehensif mengenai interaksi antara dinamika ekologi, tekanan wisata, dan aspek sosial-ekonomi. Untuk mengevaluasi kesesuaian model digunakan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), yang mengukur rata-rata persentase kesalahan antara hasil simulasi dan data nyata. Validasi ini memastikan bahwa model mampu merepresentasikan interaksi antar-aspek dan tren sistem nyata, sehingga dapat digunakan untuk analisis skenario dan perencanaan pengelolaan berkelanjutan di kawasan Pemuteran.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil survei biofisik menunjukkan bahwa kondisi terumbu karang di Pemuteran tergolong baik. Data ini konsisten dengan temuan Windayati *et al.* (2020) di KKP Buleleng Barat yang menunjukkan bahwa area Pemuteran memiliki struktur komunitas karang yang relatif lebih baik dibandingkan zona pesisir lain di Bali Utara. Variasi spasial ini menggambarkan perbedaan intensitas tekanan lokal serta efektivitas tindakan pengelolaan pada tiap lokasi. Stasiun dengan tutupan karang tertinggi berada di wilayah dengan riwayat rehabilitasi menggunakan teknologi *Biorock*, yang telah

diimplementasikan sejak awal tahun 2000 oleh masyarakat setempat. Komunitas karang didominasi oleh genus seperti *Acropora*, *Porites*, dan *Montipora*, yang menurut English *et al.* (1997) merupakan indikator ekosistem yang masih produktif. Perairan Pemuteran kaya akan karang hidup dan ikan karang yang saling berasosiasi, sehingga memiliki potensi terbaik sebagai zonasi “larang ambil”, dengan tujuan memperkaya perikanan di wilayah yang berdekatan dan menyediakan wisata penyelaman berkualitas. Beberapa titik penyelaman atau *dive spot* dan *snorkeling* di Pemuteran antara lain adalah Kesik, Lebar, Tangkad Penyu, Tangkad Jaran, Pertemuan Dekat, Napoleon, serta Pulaki Reef.

Kualitas perairan di perairan Pemuteran menunjukkan kondisi yang mendukung kesehatan terumbu karang (Tabel 1). Parameter pH berkisar 6,9–7,5, yang mendekati netral dan cukup untuk mendukung proses kalsifikasi karang. Suhu 31°C masih berada di ambang toleransi karang tropis, sedangkan oksigen terlarut (DO) 5,5–6,7 mg/l menyediakan cukup oksigen untuk metabolisme karang dan organisme simbiotiknya. Kecerahan 11–12 meter memungkinkan penetrasi cahaya yang cukup untuk fotosintesis zooxanthellae, sementara salinitas stabil di 30,25–30,55‰ mendukung keseimbangan fisiologis karang. Data oseanografi NOAA–OSCAR yang diolah pada aplikasi SURFER menunjukkan arus laut di Pemuteran bergerak dominan dari timur–barat dengan kecepatan rata-rata 0,1–0,2 m/s. Kondisi arus laut yang relatif tenang tersebut dapat mendukung distribusi nutrisi secara lokal tanpa mengganggu struktur karang (Boakes *et al.*, 2023). Arus ini membantu membawa oksigen dan unsur hara yang terbatas dari pasang surut semi-diurnal, mendukung pertumbuhan karang, sekaligus membatasi penyebaran polutan dari permukiman terdekat. Dengan demikian, kombinasi kualitas air yang baik dan arus laut yang stabil menciptakan lingkungan yang mendukung kelestarian dan produktivitas terumbu karang di kawasan wisata menyelam dan snorkeling Pemuteran.

Hasil analisis kesesuaian wisata menunjukkan bahwa sebagian besar lokasi pengamatan masuk kategori “sangat sesuai” hingga “cukup sesuai” untuk kegiatan *snorkeling* dan *diving*. Parameter seperti kedalaman (2–10 m), kecerahan tinggi, kondisi arus tenang, dan tutupan karang yang baik mendukung aktivitas rekreasi bawah laut. Namun, hasil perhitungan daya dukung menunjukkan bahwa beberapa lokasi telah mengalami tekanan melebihi kapasitas ekologisnya (Windayati *et al.*, 2020).

Fenomena melampaui daya dukung ini sesuai dengan temuan Mutaqin *et al.* (2019), yang melaporkan bahwa intensitas ekowisata di beberapa titik KKP Buleleng Barat telah melampaui kapasitas lingkungan terutama pada musim puncak kunjungan. Jika tidak dikendalikan, wisata berlebih dapat mempercepat kerusakan fisik karang akibat kontak fisik yang tidak disengaja, penggunaan *fin*/sirip, dan sedimentasi yang diaduk oleh pergerakan wisatawan.

Analisis ekonomi berbasis TEV menunjukkan bahwa jasa ekosistem terumbu karang di Pemuteran memiliki nilai ekonomi tinggi dimana Windayati *et al.* (2022) Menjelaskan bahwa terumbu karang di Pemuteran memiliki manfaat tidak langsung sebagai pelindung pantai dan habitat ikan, yang dapat diestimasi dengan biaya pengganti tanggul gelombang (Rp5,84 juta per meter) dan kolam *nursery* ikan (Rp8 juta per hektar per tahun). Analisis kesesuaian wisata menunjukkan sebagian besar lokasi sangat sesuai untuk *snorkeling* dan *diving*, namun beberapa titik telah melebihi daya dukung ekologis, sehingga meningkatkan risiko kerusakan fisik karang. Berdasarkan analisis TEV, jasa ekosistem ini bernilai lebih dari USD 12 juta per tahun, sehingga penurunan tutupan karang berpotensi menimbulkan kerugian ekonomi signifikan bagi masyarakat lokal dan pemerintah daerah. Hal ini menegaskan perlunya pengelolaan berkelanjutan untuk menjaga stabilitas ekologi sekaligus manfaat ekonomi dari pariwisata dan sumber daya laut (Wally *et al.*, 2024).

Konseptualisasi model dimulai dengan mengidentifikasi variabel-variabel kunci dalam sistem dan menelusuri hubungan antarvariabel menggunakan alat seperti diagram sebab-akibat, diagram *stock and flow*, dan diagram alir. Pendekatan ini membantu memperjelas alur pikir model sehingga pembaca dapat memahami dinamika sistem secara lebih mendalam. Chang *et al.* (2008), bobot terbesar diberikan pada sub-model ekologi (40%), diikuti sub-model sosial dan ekonomi (masing-masing 30%), karena aspek ekologis memiliki pengaruh langsung terhadap keberlanjutan terumbu karang di Pemuteran. Namun, pengelolaan yang hanya berfokus pada ekologi tidak cukup; dinamika

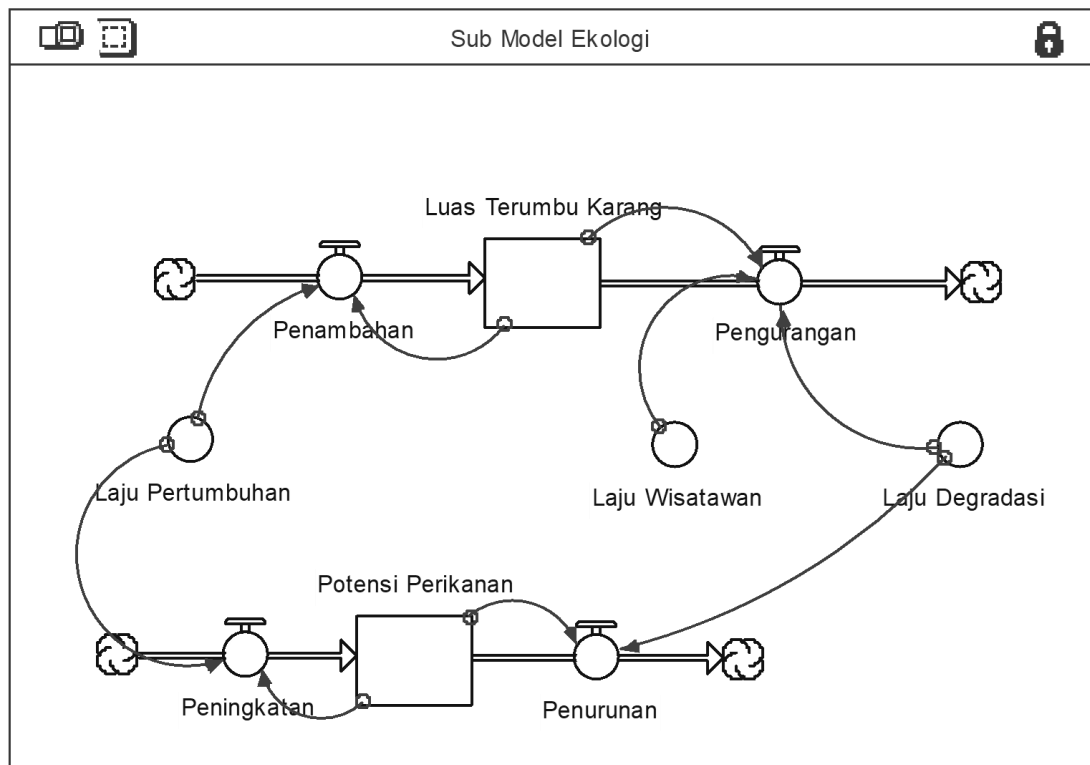
kunjungan wisata dan faktor sosial ekonomi juga memengaruhi keberlanjutan aktivitas wisata. Karena itu, setiap variabel pada ketiga sub-model perlu dikelompokkan dan dinilai untuk menentukan skenario pengelolaan yang paling tepat. Integrasi ketiga sub-model inilah yang menghasilkan skenario pengelolaan paling efektif dibandingkan dengan pendekatan sektoral. Dengan memahami interaksi antarvariabel dalam sistem dan memasukkan parameter hasil analisis potensi sumber daya, valuasi ekosistem, serta atribut tambahan dari kajian literatur, model pengelolaan terumbu karang yang komprehensif dapat dibangun untuk mendukung keberlanjutan kawasan wisata bahari di Pemuteran.

Sub-model ekologi (Gambar 2) terdiri dari lima atribut utama yang berperan sebagai stok maupun konverter, yaitu luas terumbu karang, potensi perikanan, laju pertumbuhan karang, laju degradasi, dan laju wisatawan. Nilai awal stok diperoleh dari hasil analisis potensi sumber daya, dengan luas tutupan terumbu karang sebesar 4.487.100 m² dan potensi perikanan 75 ton, sementara laju pertumbuhan (0,13) dan degradasi (0,26) merujuk pada hasil penelitian WWF (2003) dan Windayati *et al.* (2022) di kawasan Buleleng Barat. Laju wisatawan sebesar 0,48 dihitung dari tren kunjungan 2008–2017. Atribut-atribut ini menjadi dasar perumusan dinamika ekosistem, di mana aspek ekologis harus menjadi fondasi utama dalam pengembangan wisata pesisir karena perencanaan yang terintegrasi mampu memberikan manfaat ekologis, estetis, dan ekonomis bagi masyarakat dan pemerintah.

Tabel 1. Kualitas Perairan di Kawasan Perairan Pemuteran

Parameter	Kualitas Perairan	Baku Mutu Perairan*
Kecerahan	11 – 12 meter	> 6 meter
Suhu	30 ⁰ C	30 ⁰ C
pH	6,9 – 7,5	7 – 8.5
Salinitas	30,25 – 30,55 ‰	30 ‰
Oksigen terlarut (DO)	5,5 – 6,7 mg/l	>5 mg/l

Sumber: Data *In-situ* dan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup (2004)*



Gambar 2. Model Konseptual Sistem Dinamik Berdasarkan Dimensi Ekologi

Sub-model sosial (Gambar 3) dibangun dari hasil analisis terhadap pengalaman dan kepuasan wisatawan selama berkunjung ke Pemuteran, yang mencerminkan persepsi mereka terhadap kualitas destinasi dan ekosistem terumbu karang. Jumlah tenaga kerja di penginapan digunakan sebagai stok untuk merepresentasikan peran masyarakat dalam mendukung aktivitas wisata bahari. Nilai-nilai dalam sub-model ini, seperti koefisien kepuasan wisatawan terhadap ekosistem terumbu karang ($qC = 0,75$), kepuasan terhadap wisata bahari ($qR = 0,16$), dan partisipasi masyarakat ($0,34$), diperoleh melalui analisis regresi berdasarkan survei wisatawan dan wawancara dengan warga lokal. Atribut lainnya meliputi populasi wisatawan (27.018), jumlah tenaga kerja (1.158), dan jumlah penginapan (44), yang secara keseluruhan menggambarkan dinamika sosial yang memengaruhi aktivitas wisata di Pemuteran.

Sub-model ekonomi (Gambar 4) dibangun berdasarkan populasi wisatawan sebagai stok utama dan nilai ekonomi ekosistem terumbu karang sebagai komponen kunci dalam dinamika pengelolaan. Pada tahun 2019, total valuasi ekonomi ekosistem terumbu karang di Kawasan Konservasi Perairan Buleleng Barat mencapai Rp167,69 miliar dengan nilai ekonomi wisata terumbu karang sebesar Rp144,63 miliar (Windayati *et al.*, 2022). Variabel lain yang memengaruhi model ini mencakup surplus konsumen, koefisien biaya perjalanan, pendapatan, jarak tempuh, dan lama kunjungan yang diperoleh melalui analisis regresi. Atribut-atribut tersebut menggambarkan hubungan antara aktivitas wisata, nilai ekonomi kawasan, dan ketergantungan masyarakat terhadap keberlanjutan ekosistem terumbu karang.

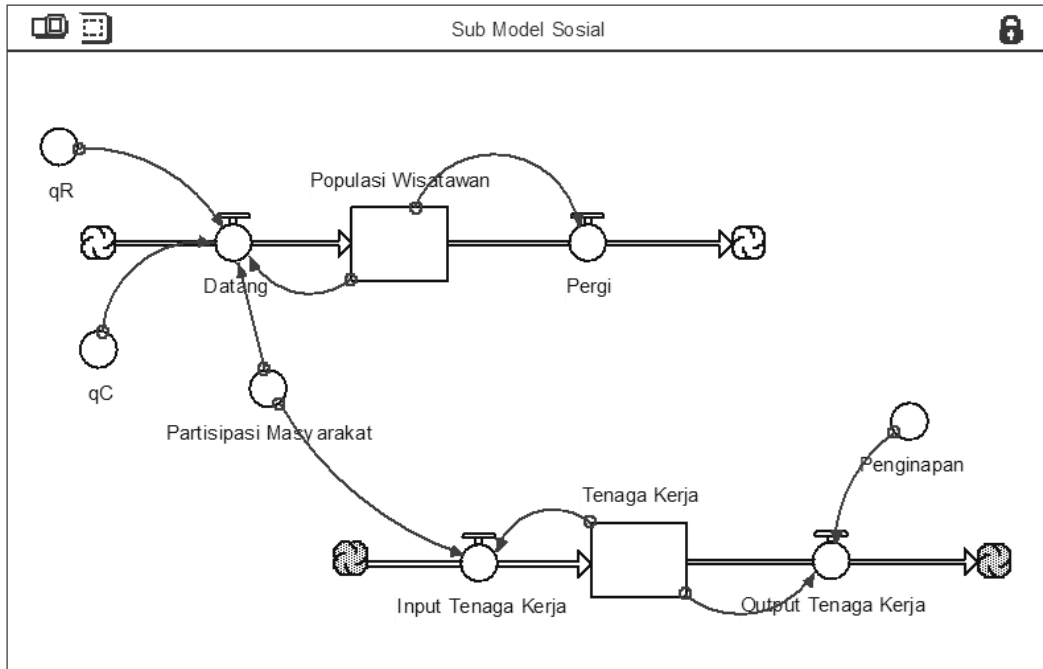
Model aktual menunjukkan bahwa kondisi ekosistem terumbu karang di Pemuteran terus Pada sub-model ekologi, skenario alternatif menerapkan kebijakan restorasi melalui berbagai upaya seperti teknologi biorock dan transplantasi terumbu karang sebesar 30% dari Kawasan Pemuteran setiap tahun. Simulasi menunjukkan hasil positif: tutupan karang meningkat 10,94% dalam 20 tahun, dan potensi perikanan meningkat drastis dari 75 ton menjadi 221 ton. Peningkatan ini didukung oleh pemulihan habitat, berkurangnya tekanan wisata, dan kondisi lingkungan yang lebih baik. Namun keberhasilan pemulihan tetap bergantung pada kesesuaian lokasi, kondisi lingkungan, dan ketersediaan larva karang.

Pada sub-model sosial, skenario alternatif menyesuaikan jumlah wisatawan agar tidak melampaui daya dukung kawasan dengan menetapkan nilai awal populasi wisatawan pada angka yang aman (13.140 orang). Dalam 20 tahun, wisatawan meningkat menjadi 42.153 orang, namun tetap berada dalam batas daya dukung. Jumlah tenaga kerja juga meningkat secara terkendali. Skenario ini menekankan pentingnya peran pemerintah, masyarakat, dan pelaku wisata dalam menjaga keseimbangan antara pemanfaatan dan kelestarian.

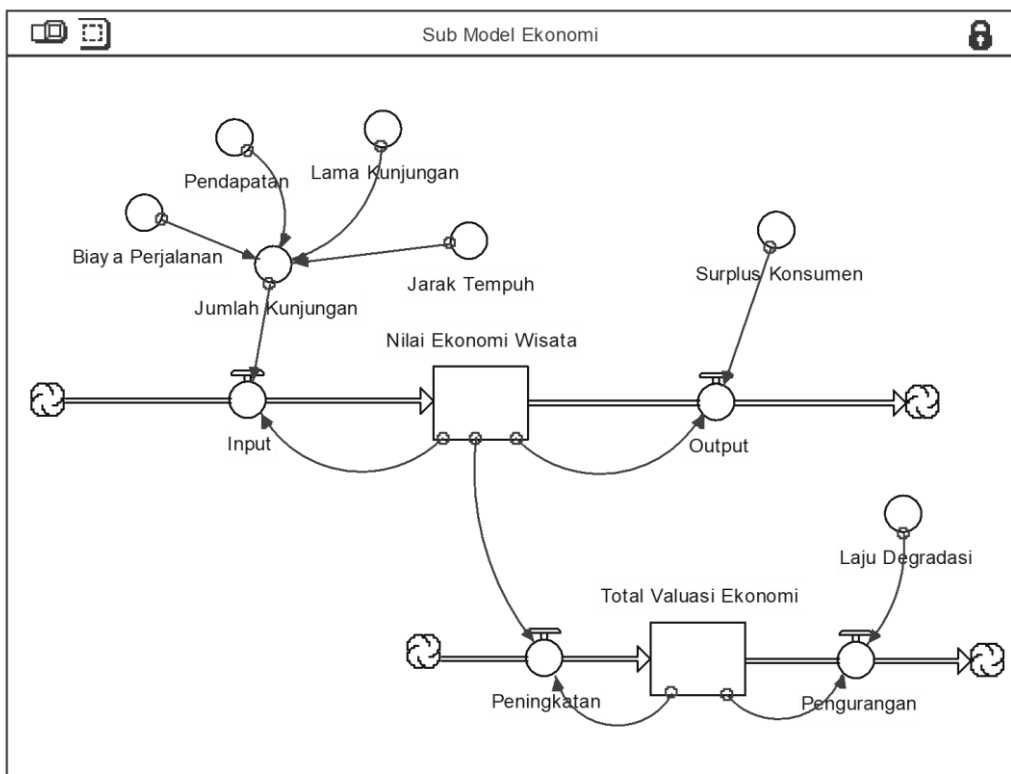
Pada sub-model ekonomi, atribut berupa koefisien *Willingness to Pay* (WTP) yang meliputi kualitas perairan, kualitas ekosistem, dan pendapatan, dimasukkan untuk meningkatkan estimasi nilai ekonomi kawasan. Hasil simulasi menunjukkan kenaikan signifikan total valuasi ekonomi, melonjak 94% menjadi lebih dari Rp3,18 triliun dalam 20 tahun, sementara nilai ekonomi wisata tetap stabil sebagai bagian dari nilai guna langsung. Analisis menunjukkan bahwa kondisi ekosistem terumbu karang yakni keragaman karang dan biota laut di dalamnya serta kecerahan perairan, menjadi faktor utama yang memengaruhi WTP wisatawan. Wisatawan cenderung bersedia membayar lebih tinggi di lokasi dengan visibilitas air yang baik dan keanekaragaman biota laut yang tinggi, dibandingkan lokasi sedimentasi tinggi. Temuan ini penting untuk merancang strategi tarif masuk kawasan konservasi di masa depan, di mana harga tiket dapat disesuaikan dengan kualitas pengalaman ekowisata yang disediakan, sekaligus mendorong konservasi. Contoh pengelolaan ekonomi berbasis terumbu karang seperti di Great Barrier Reef Australia (Mankad *et al.*, 2025), dan Sanya, China (Liu *et al.*, 2025), memperkuat urgensi strategi ini.

Ketika ketiga sub-model digabungkan, hasil simulasi menunjukkan bahwa model alternatif mampu meningkatkan tutupan karang, pengendalian jumlah wisatawan, peluang kerja, serta nilai ekonomi kawasan secara serempak (Gambar 5). Dengan kata lain, skenario alternatif memberikan hasil yang paling optimal dan berkelanjutan, sejalan dengan analisis *trade-off* oleh Chang *et al.* (2008). yang menunjukkan bahwa pembatasan jumlah wisatawan dalam skenario ini dapat menurunkan pendapatan masyarakat pada tahun-tahun awal. Maka dari itu, strategi kompensasi ekonomi seperti pengembangan kegiatan ekonomi alternatif berbasis ekosistem, seperti ekowisata

berbasis komunitas, pembuatan produk kerajinan lokal, dan jasa pendukung wisata, diperlukan untuk menjaga pendapatan tetap stabil. Model ini tetap menjamin keberlanjutan ekosistem dengan memperjelas keterkaitan antar komponen sistem melalui pemodelan dinamik.



Gambar 3. Model Konseptual Sistem Dinamik Berdasarkan Dimensi Sosial

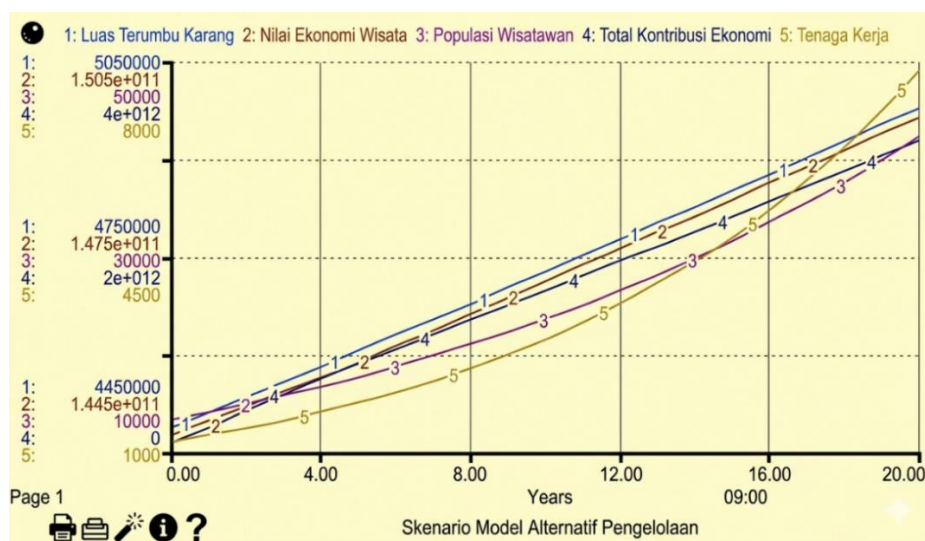


Gambar 4. Model Konseptual Sistem Dinamik Berdasarkan Dimensi Ekonomi

Agar skenario alternatif berjalan efektif, dua hal utama perlu diperhatikan: (1) program restorasi dan rehabilitasi terumbu karang sebaiknya berbasis masyarakat (*coastal community-based*) yang melibatkan desa, desa adat, pecalang segara, NGO, dan *dive resort*; (2) masyarakat perlu dilatih dan diberdayakan melalui pendidikan konservasi yang mencakup konsep, desain, struktur, serta prosedur teknis restorasi dan rehabilitasi (Hafezi et al. (2021); Windayati dkk. (2025); Hodges & Hallock (2025). Dengan demikian, skenario alternatif dapat menjadi dasar pengelolaan ekosistem terumbu karang yang lebih adaptif, berkelanjutan, dan tetap memberikan manfaat ekonomi bagi masyarakat.

Verifikasi dan validasi merupakan tahapan fundamental dalam pemodelan sistem dinamik untuk memastikan bahwa model yang dibangun mampu merepresentasikan kondisi nyata pengelolaan ekosistem terumbu karang secara andal dan berkelanjutan (Hodges & Hallock, 2025). Pendekatan ini sejalan dengan pandangan Lestari (2022) yang menegaskan bahwa pengelolaan lingkungan pesisir berbasis sistem dinamik harus melalui verifikasi struktur dan validasi perilaku model agar hubungan antarvariabel ekologi, sosial, dan ekonomi benar-benar mencerminkan dinamika lapangan; tanpa proses tersebut, hasil simulasi berpotensi menghasilkan rekomendasi kebijakan yang tidak realistis atau sulit diterapkan. Selain itu, kesesuaian output model dengan data empiris, seperti tren degradasi sumber daya dan tekanan aktivitas manusia, menjadi indikator utama keandalan model dalam mendukung perencanaan pengelolaan pesisir berkelanjutan, yang dalam penelitian ini tercermin dari hasil verifikasi struktur model yang telah mampu menggambarkan keterkaitan dan batasan antardimensi, termasuk peran daya dukung kawasan dalam membatasi pengembangan wisata bahari.

Sejalan dengan hal tersebut, Ding *et al.* (2025) menunjukkan bahwa perbandingan hasil simulasi model dengan data lapangan jangka panjang merupakan langkah esensial untuk meningkatkan kredibilitas model ekosistem pesisir dan kemampuannya dalam memproyeksikan dampak jangka panjang dari tekanan antropogenik serta kebijakan pengelolaan. Pada penelitian ini, validasi model dilakukan dengan MAPE untuk menilai kesesuaian hasil simulasi terhadap data aktual. Prediksi penurunan hasil perikanan hingga 93,33% dalam 20 tahun memiliki MAPE rendah jika dibandingkan dengan penurunan historis 50,81% dalam 10 tahun terakhir, sementara prediksi luas tutupan terumbu karang yang menurun hingga 70% selama dua tahun menunjukkan deviasi relatif kecil terhadap data BPS Provinsi Bali. Peningkatan nilai ekonomi wisata yang dihasilkan model juga konsisten dengan pertumbuhan PDRB Kabupaten Buleleng, menegaskan bahwa model mampu menangkap tren ekonomi, sosial, dan ekologis secara simultan. Dengan demikian, verifikasi dan validasi, yang diperkaya dengan evaluasi kuantitatif, membuktikan bahwa model cukup akurat untuk digunakan sebagai dasar perumusan kebijakan pengelolaan ekosistem terumbu karang yang adaptif dan berkelanjutan.



Gambar 5. Gabungan Skenario Model Alternatif

KESIMPULAN

Ekosistem terumbu karang di Pemuteran berada dalam kondisi yang relatif baik namun menghadapi tekanan dari peningkatan limbah domestik, intensitas wisata bahari, hingga dinamika sosial-ekonomi. Analisis kesesuaian wisata dan daya dukung memperlihatkan bahwa Pemuteran memiliki potensi besar untuk pengembangan rekreasi bawah laut, namun beberapa titik telah mengalami tekanan wisata melebihi kapasitas ekologisnya, sehingga berisiko mempercepat kerusakan fisik karang. Valuasi ekonomi mengonfirmasi bahwa ekosistem terumbu karang memberikan kontribusi ekonomi sangat besar melalui jasa wisata, perikanan, dan perlindungan pantai, sehingga kerusakan ekosistem akan berimplikasi langsung pada menurunnya kesejahteraan masyarakat. Model dinamik yang dikembangkan memperlihatkan bahwa skenario aktual belum mampu menjaga keberlanjutan ekologi, sosial, dan ekonomi secara simultan, karena simulasi menunjukkan penurunan drastis tutupan karang dan potensi perikanan, serta pertumbuhan wisatawan yang melampaui daya dukung. Sebaliknya, skenario alternatif yang memasukkan intervensi restorasi, pengendalian jumlah wisatawan, dan peningkatan kualitas perairan terbukti lebih efektif, menghasilkan kenaikan tutupan karang, peningkatan potensi perikanan, keseimbangan sosial, serta lonjakan valuasi ekonomi yang jauh lebih besar. Verifikasi dan validasi model mengonfirmasi bahwa perilaku simulasi konsisten dengan tren data empiris, sehingga model dapat digunakan sebagai alat bantu pengambilan keputusan dalam perencanaan pengelolaan berbasis ekosistem. Dengan demikian, keberlanjutan ekosistem terumbu karang Pemuteran hanya dapat dicapai melalui pengelolaan terpadu yang menggabungkan rehabilitasi ekologi, pengendalian wisata, pemberdayaan masyarakat, serta penerapan kebijakan konservasi berbasis ilmu pengetahuan dan kolaborasi multipihak.

DAFTAR PUSTAKA

- Ampou, E.E., Manessa, M.D.M., Hamzah, F., & Widagti, N. 2020. Study of sea surface temperature (SST), does it affect coral reefs?. *Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan*, 12(2): 199–213. DOI: 10.20473/jipk.v12i2.20316
- Boakes, Z., Suryaputra, I.G.N.A., Hall, A.E., Franklin, J. D., Stafford, R. 2023. Nutrient dynamics, carbon storage and community composition on artificial and natural reefs in Bali, Indonesia. *Mar Biol* 170, 130. DOI: 10.1007/s00227-023-04283-4
- Cesar, H., & Chong, C. 2004. Economic Valuation and Socioeconomics of Coral Reefs: Methodological Issues and Three Case Studies. In *Economic Valuation and Policy Priorities for Sustainable Management of Coral Reefs*. Penang, Malaysia: WorldFish Center.
- Casagrandi, R., & Rinaldi, S. 2002. A theoretical approach to tourism sustainability. *Conservation Ecology*, 6(1): 13
- Chang, Y.C., Hong, F.W., & Lee, M.T. 2008. A system dynamic based DSS for sustainable coral reef management in Kenting coastal zone, Taiwan. *Journal of Ecological Modelling*, 211(1): 153–168. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2007.09.001
- Ding, J., McDowell, N., Bailey, V., Conroy, N., Day, D.J., Fang, Y., Kemner, K.M., Kirwan, M.L., Koven, C.D., Kovach, M., Megonigal, P., Morris, K.A., O'Meara, T., Pennington, S.C., Peixoto, R.B., Thornton, P., Weintraub, M., Regier, P., Sandoval, L., Machado-Silva, F., Stearns, A., Ward, N., & Wilson, S.J. 2025. Modeling the mechanisms of coastal vegetation dynamics and ecosystem responses to changing water levels. *Biogeosciences*, 22: 6963–6978. DOI: 10.5194/bg-22-6963-2025
- Dunning, K.H. 2015. Ecosystem services and community-based coral reef management institutions in post blast-fishing Indonesia. *Ecosystem Services*, 16(1): 319–332. DOI: 10.1016/j.ecoser.2014.11.010
- English, S., Wilkinson, C., & Baker, V. 1997. *Survei manual for tropical marine resources*. Australian Institute of Marine Science. Townsville.
- Forrester, J.W. 1999. *System dynamics: The foundation under systems thinking*. Sloan School of Management. Cambridge.
- Hafezi, M., Stewart, R. A., Sahin, O., Giffin, A. L., & Mackey, B. 2021. Evaluating coral reef ecosystem services outcomes from climate change adaptation strategies using integrative system dynamics. *Journal of Environmental Management*, 285, 112082. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112082
- Hodges, L., & Hallock, P. 2025. *Coral Reef Restoration Techniques and Management Strategies in the*

- Caribbean and Western Atlantic: A Quantitative Literature Review. *Diversity*, 17(6), 434. DOI: 10.3390/d17060434
- IPCC. 2023. Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. Geneva. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004. Tentang baku mutu air laut. Jakarta.
- Lestari, F. 2022. Environmental management strategy for coastal waters through a dynamic system approach in Tanjungpinang City region, Riau Islands, Indonesia. *Akuatikisle: Jurnal Akuakultur, Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil*, 6(2): 141–147. DOI: 10.29239/j.akuatikisle.6.2.141-147
- Liao, T., & Chen, J. 2025. Dynamics of a coral reef system under climate change. *Chinese Journal of Physics*. DOI: 10.1016/j.cjph.2025.10.031
- Liu, M., Xu, Q., Hu, X., Gao, F., & Wang, A. (2025). Ornamental reef and its application in tropical recreational marine ranch: A case study of Wuzhizhou Island marine ranch in Sanya, Hainan. *Natural Science of Hainan University*, 43(4), 355–363. DOI: 10.15886/j.cnki.hndk.2024111101
- Mankad, A., Hobman, E. V., Curnock, M., Dyer, M., & Pert, P. 2025. Perceived need for management interventions in the Great Barrier Reef. *Marine Policy*, 180, 106796. DOI: 10.1016/j.marpol.2025.106796
- Marfai, M.A., Ahmada, B., Mutaqin, B.W., & Windayati, R. 2020. Dive resort mapping and network analysis: Water resources management in Pemuteran coastal area, Bali – Indonesia. *Geographia Technica*, 15(2): 106–116. DOI: 10.21163/GT_2020.152.11
- Mutaqin, B.W., Marfai, M.A., Helmi, M., Rindarjono, M.G., Windayati, R., & Sunarto. 2019. Spatio-temporal mapping of ecotourism activities in Buleleng conservation zone: A methodological review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 451: 1–7. DOI: 10.1088/1755-1315/451/1/012095
- Obura, D.O., Aeby, G., Amorntammarong, N., Appeltans, W., Bax, N., Bishop, J., Brainard, R.E., Chan, S., Fletcher, P., Gordon, T.A.C., Gramer, L., Gudka, M., Halas, J., Hendee, J., Hodgson, G., Huang, D., Jankulak, M., Jones, A., Kimura, T., Levy, J., Miloslavich, P., Chou, L.M., Muller-Karger, F., Osuka, K., Samoilys, M., Simpson, S.D., Tun, K., & Wongbusarakum, S. 2019. Coral reef monitoring, reef assessment technologies, and ecosystem-based management. *Frontiers in Marine Science*, 6: 580. DOI: 10.3389/fmars.2019.00580
- Wahyudin, Y., Mahipal, M., Riadi, S., Dewantara, E., Wahyudin, M., Wahyudin, M., & Wahyudin, A. 2025. Extended Valuation of Coral Reef Ecosystem Services (2017–2025): Model and Policy Insight. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, 29(5), 827-844. DOI: 10.21608/ejabf.2025.415203.6425
- Wally, K., Williamson, R., & Dunning, K. 2024. Coral reefs and climate change: Examining two institutional approaches to managing a novel marine ecosystem. *Marine Policy*, 163, 106107. DOI: 10.1016/j.marpol.2024.106107
- Windayati, R., Marfai, M.A., Pangaribowo, E.H., & Mardiatno, D. 2020. Potential, suitability, and carrying capacity of coral reef ecosystem in West Buleleng MPA. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 584: 1–8. DOI: 10.1088/1755-1315/584/1/012048
- Windayati, R., Mutaqin, B.W., Marfai, M.A., Pangaribowo, E.H., Helmi, M., & Rindarjono, M.G. 2022. Assessment of coral-reef ecosystem services in West Buleleng Conservation Zone, Bali, Indonesia. *Journal of Coastal Conservation*, 26: 43. DOI: 10.1007/s11852-022-00890-3
- Windayati, R., Widyanarko, U., Lestari, A. P. 2025. Partisipasi Masyarakat dalam Upaya Konservasi Mangrove di Provinsi Bali. *Jurnal Celebica: Jurnal Kehutanan Indonesia*, 6(2), 311–320. DOI: 10.65078/jc.v6i2.203
- WWF. 2003. Monitoring the coral reefs at Bali Barat National Park, monitoring report in 1996–2002. WWF Indonesia-Wallacea Bioregion.