

Kontribusi Limbah Kayu Daratan terhadap Sampah Laut di Pesisir Selatan Bali: Tinjauan Antropogenik dan Strategi Adaptasi Berbasis Ekosistem

I Wayan Koko Suryawan

Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Perencanaan Infrastruktur, Universitas Pertamina, Indonesia

*Koresponden email: i.suryawan@universitaspertamina.ac.id

Diterima: 5 April 2025

Disetujui: 12 April 2025

Abstract

The recurring accumulation of marine debris along the southern coast of Bali, particularly wood fragments and plastic waste, reflects the complex interaction between land-based human activities, climate change, and coastal oceanographic dynamics. This study aims to examine the potential contribution of terrestrial wood waste to marine debris in major tourist areas such as Kuta and Kedonganan beaches. The research applies a combined method of direct field observation during the west monsoon season and a comprehensive literature review, including secondary data on waste composition, ocean currents, and terrestrial waste management systems. Observations indicate that Kuta Beach is predominantly affected by wood debris such as branches and tree trunks while lighter plastic packaging is more common in areas like Kedonganan, suggesting that current strength influences the distribution of waste types. Analysis of household waste composition in several Bali districts reveals that wood and branch waste form a significant portion, particularly in Jembrana, Bangli, and Buleleng, supporting the hypothesis that much of the marine wood debris originates from upstream land-based sources via river systems. Intensified rainfall and riparian degradation—driven by land-use change and climate variability accelerate the transport of organic waste to the sea. This study recommends integrated ecosystem-based adaptation strategies, including lignolytic microbial decomposition, the installation of floating booms at river mouths, and the conversion of wood waste into circular economy products such as biochar through pyrolysis and wood-plastic composites.

Keywords: *wood waste; marine debris; climate change; Bali; waste management; circular economy; ecosystem adaptation*

Abstrak

Fenomena tahunan berupa tumpukan sampah di pesisir selatan Bali, khususnya kayu-ranting dan plastik, menunjukkan adanya hubungan erat antara aktivitas antropogenik darat, perubahan iklim, dan dinamika oseanografi pesisir. Studi ini bertujuan untuk menganalisis potensi kontribusi limbah kayu daratan terhadap sampah laut (*marine debris*) di kawasan wisata Bali, dengan fokus pada Pantai Kuta, Kedonganan, dan sekitarnya. Metode yang digunakan adalah observasi langsung di lapangan selama musim angin barat dan kajian literatur ilmiah serta data sekunder terkait komposisi sampah, arus laut, dan sistem pengelolaan limbah darat. Hasil observasi menunjukkan bahwa Pantai Kuta cenderung didominasi oleh kayu dan batang pohon, sedangkan pantai lain lebih banyak menerima plastik ringan, yang mengindikasikan bahwa kekuatan arus berperan dalam distribusi jenis sampah. Analisis komposisi sampah rumah tangga di Provinsi Bali mengungkap bahwa limbah kayu-ranting mendominasi di sejumlah kabupaten seperti Jembrana, Bangli, dan Buleleng, memperkuat hipotesis bahwa sumber utama debris kayu berasal dari daratan melalui sistem aliran sungai. Intensifikasi curah hujan dan kerusakan vegetasi riparian akibat perubahan iklim dan konversi lahan mempercepat transportasi limbah organik menuju laut. Studi ini merekomendasikan pendekatan adaptif berbasis ekosistem dan teknologi, seperti dekomposisi mikroba lignolitik, pemanfaatan floating boom di muara sungai, serta konversi limbah kayu menjadi produk ekonomi sirkular melalui pirolisis dan komposit kayu-plastik.

Kata Kunci: *sampah kayu; debris laut; perubahan iklim; Bali; pengelolaan limbah; ekonomi sirkular; adaptasi ekosistem*

1. Pendahuluan

Permasalahan sampah laut (*marine debris*) telah menjadi isu lingkungan global yang mendesak, terutama di wilayah pesisir dan laut tropis yang rentan terhadap dampak pencemaran [1], [2], [3]. Dalam beberapa dekade terakhir, peningkatan populasi, urbanisasi, dan konsumsi yang tidak berkelanjutan telah

berkontribusi signifikan terhadap meningkatnya jumlah sampah [4], [5], [6], [7]. Sekitar 80% sampah laut diketahui berasal dari aktivitas daratan, terutama dari limbah domestik, industri, dan pertanian yang tidak tertangani dengan baik [8]. Indonesia sebagai negara kepulauan dengan garis pantai yang panjang menjadi salah satu penyumbang utama sampah laut dunia, termasuk dalam bentuk plastik dan sampah organik seperti kayu-ranting [9], [10]. Di antara wilayah-wilayah rawan, Bali menempati posisi strategis sekaligus rentan karena merupakan destinasi wisata internasional yang memiliki tekanan tinggi terhadap lingkungan pesisirnya. Fenomena musiman berupa tumpukan sampah di pantai-pantai selatan Bali, khususnya Pantai Kuta, Kedonganan, dan Dreamland, telah menjadi perhatian publik, media, dan komunitas internasional [11]. Tumpukan ini terdiri dari berbagai jenis sampah, termasuk plastik sekali pakai, styrofoam, dan yang paling mencolok adalah limbah kayu berupa batang pohon, ranting, dan serpihan kayu besar yang terdampar di *zona intertidal*. Kejadian ini secara visual sangat mengganggu estetika pantai dan mengganggu aktivitas wisatawan. Namun lebih dari itu, keberadaan sampah kayu dalam jumlah besar memunculkan pertanyaan mendasar tentang asal-usulnya, pola pergerakannya, dan hubungan antara sampah organik daratan dengan pencemaran laut.

Arus laut musiman yang kuat membawa sampah-sampah tersebut ke selatan dan mengendapkannya di pantai-pantai yang menjadi pusat aktivitas wisata. Dalam konteks ini, jenis arus dan kekuatan gelombang berperan besar dalam menentukan jenis sampah yang mencapai pantai. Kayu yang memiliki densitas lebih tinggi dari plastik lebih mungkin terdorong oleh arus yang kuat [12], seperti yang terjadi di Pantai Kuta, sedangkan plastik ringan lebih sering ditemukan di pantai dengan arus yang lebih lambat seperti Kedonganan. Namun, arus laut bukan satu-satunya faktor yang menjelaskan keberadaan limbah kayu dalam jumlah besar. Faktor antropogenik dari daratan menjadi penyumbang utama yang harus dikaji secara serius. Di sejumlah kabupaten di Bali, seperti Jembrana, Bangli, dan Buleleng, data menunjukkan bahwa komposisi sampah rumah tangga dan desa-desa di kawasan tersebut didominasi oleh limbah organik, terutama kayu dan ranting [13]. Ini berkaitan erat dengan kegiatan penebangan pohon, pembersihan lahan, serta praktik pertanian dan perumahan yang tidak menerapkan sistem konservasi tanah dan air secara optimal. Ketika hujan deras datang, sampah tersebut terbawa aliran permukaan ke sungai dan kemudian ke laut tanpa proses penyaringan atau pemrosesan di tingkat lokal [14]. Hal ini menunjukkan adanya hubungan langsung antara degradasi ekosistem daratan dan pencemaran lingkungan laut yang sering diabaikan dalam tata kelola [15], [16], [17], [18], [19].

Perubahan iklim memperparah situasi tersebut. Anomali cuaca yang ditandai dengan meningkatnya intensitas dan frekuensi hujan ekstrem, perubahan arah angin musiman [20], dan naiknya permukaan air laut telah mempercepat proses limpasan dan memperbesar volume sampah yang dibawa dari hulu ke hilir. Ketika vegetasi riparian mengalami kerusakan atau hilang, daya serap tanah menurun drastis, dan akibatnya sampah kayu yang sebelumnya tertahan di darat kini lebih mudah masuk ke sistem sungai. Di sisi lain, pembangunan infrastruktur dan urbanisasi yang cepat di beberapa kawasan Bali juga memperkecil ruang resapan air, mempercepat aliran permukaan, dan menambah tekanan pada sistem drainase dan sungai yang sudah tidak memadai. Sayangnya, pengelolaan limbah kayu belum menjadi prioritas dalam kebijakan lingkungan di Indonesia, termasuk Bali. Fokus pemerintah daerah dan pusat masih lebih banyak tertuju pada pengurangan sampah plastik dan peningkatan daur ulang, padahal limbah kayu juga memiliki potensi besar sebagai penyumbang sampah laut, terutama dalam konteks tropis dan wilayah dengan tutupan vegetasi yang luas. Limbah kayu, meskipun bersifat organik dan dapat terdegradasi secara alami, dalam jumlah besar tetap menimbulkan masalah ekologis [21], [22], [23]. Fragmen kayu dapat merusak terumbu karang, mengganggu aktivitas perikanan, dan menurunkan kualitas habitat biota laut. Dalam konteks pariwisata, sampah kayu juga mengganggu estetika pantai, menurunkan kenyamanan wisatawan, serta menambah beban pengelolaan bagi pemerintah daerah dan pelaku usaha lokal.

Studi ini dilatarbelakangi oleh kebutuhan untuk memahami lebih dalam keterkaitan antara sampah kayu dari daratan dan keberadaannya sebagai debris laut. Dengan pendekatan observasi langsung dan kajian literatur, studi ini berupaya untuk menguji hipotesis bahwa komposisi sampah kayu yang tinggi di daratan, jika tidak dikelola dengan baik, akan bermuara menjadi bagian dari polusi laut musiman di Bali. Selain itu, studi ini bertujuan untuk mengidentifikasi teknologi dan strategi adaptasi yang dapat diterapkan untuk menangani limbah kayu secara terintegrasi baik melalui pendekatan biologis seperti dekomposisi mikroba, fisik seperti sistem penahan di muara sungai, maupun kimiawi seperti pirolisis dan produksi komposit ramah lingkungan. Dengan memahami rantai penyebab dan dampaknya secara menyeluruh, studi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi perumusan kebijakan berbasis bukti dalam pengelolaan sampah pesisir dan daratan, serta mendukung upaya Bali dalam menjaga citra sebagai destinasi wisata berkelanjutan yang bebas dari tekanan limbah musiman. Lebih jauh lagi, studi ini menggarisbawahi

pentingnya integrasi lintas sektor antara lingkungan darat dan laut dalam tata kelola sumber daya alam di tengah tantangan perubahan iklim dan pertumbuhan pembangunan yang pesat.

2. Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam studi ini merupakan kombinasi antara observasi langsung di lapangan dan kajian literatur untuk mendapatkan pemahaman komprehensif mengenai dinamika kemunculan sampah kayu di pesisir selatan Bali serta relevansinya dengan aktivitas antropogenik dan perubahan iklim. Pendekatan ini dipilih mengingat kompleksitas sumber dan pergerakan limbah yang melibatkan berbagai dimensi ekologis, sosial, spasial, hingga meteorologis. Observasi langsung dilakukan pada beberapa lokasi pantai utama di selatan Bali, antara lain Pantai Kuta, Kedonganan, Dreamland, dan Kelan, yang memiliki karakteristik berbeda baik dari segi topografi, intensitas pengunjung, maupun jumlah dan jenis sampah yang terdampar. Observasi ini dilakukan selama musim angin barat, yang secara historis merupakan periode dengan akumulasi sampah laut tertinggi di wilayah tersebut. Salah satu tujuan dari observasi ini adalah untuk mendeteksi pola spasial dan temporal dari keberadaan sampah kayu yang terdampar. Melalui pendekatan ini, peneliti dapat mengamati secara langsung bahwa Pantai Kuta lebih banyak dipenuhi oleh batang kayu, ranting, dan potongan kayu utuh dengan berbagai ukuran dan bentuk, sedangkan Kedonganan dan Dreamland cenderung didominasi oleh sampah plastik ringan seperti botol air kemasan, kantong plastik, dan styrofoam. Sebaliknya, Pantai Kelan relatif bersih dari sampah, yang diduga berkaitan dengan posisi geografisnya yang lebih terlindungi serta kedekatannya dengan kawasan bandara yang lebih teratur dalam pengelolaan. Pengamatan ini memberikan gambaran bahwa karakter arus laut dan kekuatan gelombang turut mempengaruhi jenis sampah yang terdampar di masing-masing lokasi. Dengan demikian, observasi langsung membantu menguatkan hipotesis awal bahwa arus kuat cenderung membawa material berat seperti kayu, sedangkan arus yang lebih lambat membawa sampah ringan.

Untuk melengkapi informasi dari lapangan, metode ini dipadukan dengan kajian pustaka yang bersumber dari jurnal ilmiah, laporan riset institusi nasional dan internasional, serta data statistik resmi yang relevan. Kajian literatur ini difokuskan pada tiga cakupan utama: pertama, literatur yang membahas hubungan antara aktivitas antropogenik di darat dengan pencemaran laut, terutama dalam konteks transportasi limbah kayu melalui aliran sungai; kedua, literatur yang membahas perubahan iklim, khususnya intensifikasi curah hujan dan perubahan pola angin yang mempengaruhi pergerakan arus laut dan sistem drainase alami; ketiga, referensi teknis dan ilmiah mengenai teknologi pengelolaan limbah kayu, baik secara biologis melalui dekomposisi mikroba, secara fisik melalui alat penahan limpasan, maupun secara kimiawi melalui konversi energi dan material. Dalam proses kajian literatur, peneliti menelusuri berbagai publikasi terdahulu yang secara khusus menyoroti masalah debris laut dan dampaknya di kawasan Asia Tenggara, termasuk riset yang menyebutkan bahwa sekitar 80 persen sampah laut berasal dari daratan (Jambeck et al. 2015). Literatur tersebut dikaitkan dengan konteks Bali, yang secara geografis berada di jalur perlintasan arus dan menjadi titik akumulasi limbah dari wilayah barat seperti Banyuwangi dan Jember. Referensi dari hasil pemodelan oseanografi juga digunakan untuk memperkuat argumen bahwa arus laut musiman berperan besar dalam memindahkan limbah kayu dari muara sungai ke pantai selatan Bali. Selain itu, studi sebelumnya tentang jenis-jenis plastik dan kayu yang mendominasi sampah pantai juga digunakan untuk mengelompokkan data observasi lapangan ke dalam kategori yang terstruktur, termasuk jenis kayu lunak, keras, serta fragmen kayu yang telah terurai sebagian.

Kajian literatur juga menjadi dasar dalam mengevaluasi berbagai solusi yang mungkin diterapkan untuk mengelola limbah kayu secara lebih efektif. Literatur terkait teknologi pirolisis, pre-treatment lignoselulosa, dan aplikasi wood plastic composite diadaptasi ke dalam konteks lokal Bali dengan mempertimbangkan ketersediaan infrastruktur, skala produksi, dan potensi ekonomi sirkular. Di samping itu, literatur kebijakan lingkungan, baik di tingkat nasional maupun daerah, dikaji untuk menilai kesesuaian kerangka regulasi yang ada terhadap pengelolaan limbah kayu sebagai bagian dari strategi adaptasi perubahan iklim. Dari hasil penelaahan, ditemukan bahwa kebijakan pengelolaan sampah organik masih berfokus pada sampah makanan, sementara pengolahan limbah kayu belum menjadi prioritas meskipun potensinya besar dalam pengurangan timbulan sampah dan pencemaran laut.

Penggunaan kombinasi observasi langsung dan kajian literatur memberikan keunggulan metodologis dalam studi ini. Observasi langsung memberikan data kontekstual dan deskriptif yang konkret tentang kondisi di lapangan, sedangkan kajian literatur memberikan kedalaman teoretis dan pemahaman komparatif lintas wilayah dan kasus. Kedua metode ini saling melengkapi, sehingga memungkinkan analisis yang lebih utuh mengenai penyebab dan solusi dari fenomena tumpukan sampah kayu di pesisir Bali. Melalui metode ini, studi ini tidak hanya menggambarkan kondisi yang ada, tetapi juga mengusulkan kerangka solusi

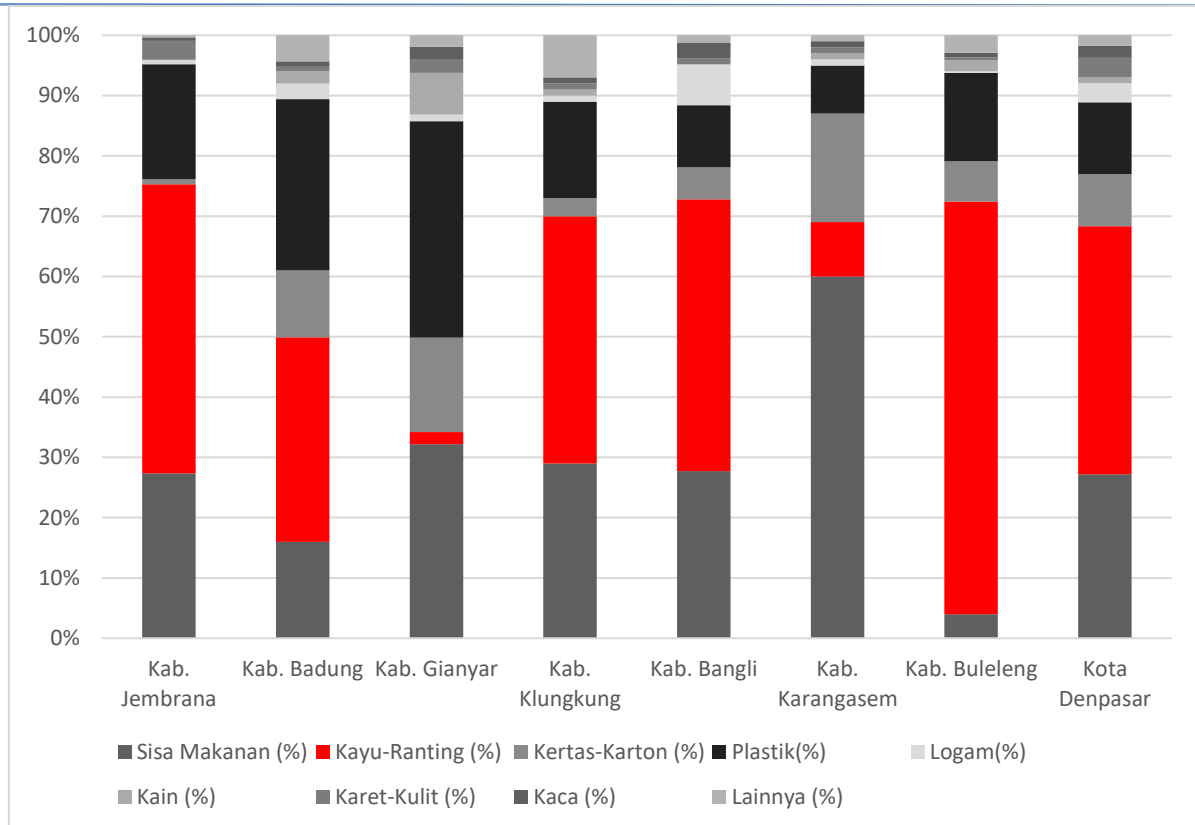
adaptif dan kebijakan berbasis bukti yang dapat diterapkan untuk meningkatkan ketahanan ekosistem pesisir dan mendukung transisi menuju pengelolaan sumber daya yang lebih berkelanjutan.

3. Hasil dan Pembahasan

Gambar 1 menyajikan komposisi sampah di seluruh kabupaten/kota di Provinsi Bali pada tahun 2024, yang menunjukkan variasi signifikan antarwilayah dalam hal jenis dan proporsi limbah yang dihasilkan. Data ini menggambarkan dominasi dua jenis sampah utama, yaitu sisa makanan dan kayu-ranting, yang secara konsisten menempati porsi terbesar di hampir seluruh daerah. Kabupaten Jembrana, Bangli, dan Buleleng memperlihatkan proporsi sampah kayu-ranting yang sangat tinggi, mencerminkan kuatnya kontribusi limbah organik dari kawasan hulu dan pedesaan. Sementara itu, wilayah seperti Kabupaten Badung dan Gianyar menampilkan komposisi sampah yang lebih beragam, termasuk proporsi plastik dan kertas-karton yang lebih besar, mencerminkan karakteristik wilayah perkotaan dan pusat pariwisata. Kota Denpasar sebagai pusat administratif dan aktivitas ekonomi menunjukkan distribusi limbah yang relatif seimbang, meskipun sisa makanan dan sampah kayu tetap mendominasi. Variasi ini menegaskan pentingnya pendekatan pengelolaan sampah yang kontekstual dan berbasis wilayah, mengingat perbedaan karakteristik sumber dan jenis limbah yang signifikan antar kabupaten/kota di Bali.

Fenomena menumpuknya sampah kayu dan plastik di pantai-pantai selatan Bali, merupakan konsekuensi dari kombinasi tekanan antropogenik dan pengaruh perubahan iklim yang saling memperkuat [24], [25], [26]. Sampah kayu yang mencakup batang pohon, ranting, dan serpihan vegetasi lainnya sebagian besar berasal dari aktivitas manusia di daratan, seperti deforestasi, konversi lahan untuk permukiman atau pertanian, dan pembangunan infrastruktur tanpa sistem konservasi tanah dan air yang memadai. Akibatnya, limpasan air saat hujan membawa material organik dalam jumlah besar ke sungai-sungai yang bermuara ke laut [27], [28]. Sungai-sungai ini menjadi jalur utama transportasi sampah karena tidak hanya menerima limbah dari wilayah padat penduduk tetapi juga dari kawasan yang mengalami degradasi hutan. Aktivitas antropogenik di hulu yang merusak tutupan vegetasi telah mempercepat erosi tanah dan menyebabkan batang dan cabang pohon terbawa hingga ke muara. Hal ini diperparah oleh rendahnya efektivitas sistem pengelolaan sampah domestik dan pertanian di kawasan pedesaan maupun urban. Sampah kayu kemudian terseret ke laut melalui aliran sungai, dan pada saat musim angin barat, arus laut membawa limbah ini ke pantai-pantai selatan Bali. Fenomena ini konsisten dengan temuan pemodelan oseanografi yang menunjukkan bahwa arus laut musiman memainkan peran penting dalam mendistribusikan sampah dari Selat Bali ke garis pantai pesisir selatan [29]. Kejadian ini mencerminkan bagaimana sistem sosial dan ekologis saling berinteraksi, di mana aktivitas manusia di daratan secara langsung berdampak pada kesehatan ekosistem pesisir [30], [31], [32], [33].

Perubahan iklim turut memperburuk kondisi ini. Meningkatnya intensitas curah hujan musiman akibat anomali iklim memperbesar volume limpasan permukaan dan mempercepat aliran material dari darat ke laut. Selain itu, pola angin dan arus laut yang berubah sebagai akibat dari pemanasan global memengaruhi jalur pergerakan sampah di perairan pesisir [34], [35]. Musim angin barat yang berlangsung antara November hingga Maret membawa arus laut dari timur ke barat dan selatan, menyebabkan sampah terdampar di pantai-pantai utama Bali. Kombinasi antara limpasan akibat hujan ekstrem dan pola arus yang lebih kuat menjadikan kawasan seperti Pantai Kuta lebih rentan terhadap akumulasi sampah berat seperti kayu. Sementara itu, pantai lain seperti Kedongan cenderung menerima sampah plastik ringan seperti kemasan air minum, karena arus yang lebih lemah hanya mampu mengangkut material dengan densitas rendah. Sebagian besar dari limbah kayu ini tidak tertangani karena sistem pengelolaan sampah di hilir belum terintegrasi untuk menangani material organik dalam jumlah besar. Padahal, dari perspektif teknis, ada berbagai pendekatan yang dapat diterapkan untuk mengelola limbah jenis ini. Secara biologis, pemanfaatan mikroorganisme lignolitik seperti jamur degradasi kayu dapat dimaksimalkan dalam proses kompos skala komunitas, yang memungkinkan limbah kayu diubah menjadi pupuk organik. Teknologi ini telah terbukti efektif dalam mengurangi volume limbah organik sekaligus meningkatkan kesuburan tanah pada konteks tropis yang lembap. Dari sisi teknologi fisik, pemasangan penghalang terapung atau boom di muara sungai terbukti mampu menangkap sampah sebelum masuk ke laut [36]. Penerapan sistem penyaringan berlapis pada drainase perkotaan juga dapat mencegah material besar terbawa ke laut selama musim hujan.



Gambar 1. Komposisi sampah di Provinsi Bali pada tahun 2024 [13]

Sementara itu, pendekatan kimia dapat diterapkan melalui proses pirolisis untuk mengubah limbah kayu menjadi biochar atau bahan bakar terbarukan [37], [38], [39]. Selain itu, limbah kayu dapat diolah menjadi komposit kayu-plastik untuk keperluan konstruksi ringan, yang mendukung pendekatan ekonomi sirkular. Dalam konteks pengolahan kimia basah, *pre-treatment* menggunakan larutan alkali juga memungkinkan lignoselulosa dari limbah kayu diolah menjadi bahan baku kemasan *biodegradable* [40], [41], yang merupakan solusi ramah lingkungan sebagai pengganti plastik. Akar dari permasalahan ini menunjukkan bahwa pantai tidak hanya menjadi tempat pembuangan akhir, tetapi juga cermin dari tekanan sistem sosial-ekologis yang terjadi di hulu. Ketika pengelolaan tata ruang tidak mempertimbangkan daya dukung ekologis, dan ketika perubahan iklim meningkatkan tekanan hidrometeorologis, maka limbah dari daratan akan terus berakhir di laut dan terdampar di pesisir. Kondisi ini diperparah oleh lambannya integrasi pengelolaan sampah berbasis wilayah, yang seharusnya mencakup kawasan hulu, tengah, dan hilir secara sinergis. Bali, sebagai kawasan strategis pariwisata nasional dan internasional, perlu menunjukkan kepemimpinan dalam menerapkan solusi teknologi dan tata kelola yang adaptif terhadap tantangan antropogenik dan iklim [42]. Dengan mendorong penerapan teknologi pengolahan limbah yang beragam dan memperkuat kolaborasi antarwilayah, Bali dapat mengurangi akumulasi limbah kayu musiman dan memperbaiki kualitas lingkungan pesisirnya.

Rekomendasi Kebijakan

Salah satu hipotesis yang penting dikaji dalam konteks pengelolaan pesisir Bali adalah kemungkinan bahwa tingginya komposisi sampah kayu di daratan, sebagaimana terlihat dalam distribusi komposisi limbah domestik beberapa kabupaten di Bali, memiliki kontribusi signifikan terhadap munculnya sampah kayu sebagai debris laut. Data terbaru menunjukkan bahwa kayu dan ranting merupakan fraksi dominan dalam komposisi sampah di kabupaten seperti Jembrana, Bangli, dan Buleleng. Hal ini memperkuat dugaan bahwa fragmen kayu yang terdampar di pantai, terutama saat musim barat, tidak hanya berasal dari perairan luar Bali, tetapi juga merupakan limpasan dari sistem darat yang tidak dikelola dengan baik. Limbah kayu dari hutan, permukiman, dan aktivitas pertanian yang tidak diawasi dapat masuk ke jaringan sungai, terbawa arus menuju muara, dan akhirnya terdorong oleh dinamika oseanografi menuju pantai. Selain faktor hidrologis dan arah arus laut musiman, perubahan iklim turut memperkuat mekanisme transfer limbah ini. Intensifikasi hujan, meningkatnya frekuensi badai lokal, dan perubahan pola angin menyebabkan aliran permukaan menjadi lebih deras dan sporadis. Hal ini mempercepat transportasi

material organik dari kawasan hulu yang telah mengalami degradasi vegetasi akibat deforestasi atau konversi lahan. Dengan sekitar 80% sampah laut berasal dari aktivitas daratan [8], hipotesis bahwa kayuranting dari darat menjadi bagian besar dari debris laut di Bali semakin kuat. Arus laut yang mengarah ke pantai selatan Bali, seperti di Pantai Kuta, memperlihatkan kecenderungan membawa material berat seperti kayu, sedangkan daerah seperti Kedonganan lebih banyak menerima plastik ringan karena arusnya yang lebih lambat.

Lemahnya pengelolaan sampah organik, khususnya limbah kayu dan ranting, memperparah situasi ini. Banyak kabupaten belum memiliki sistem pemrosesan sampah berbasis pemilahan atau pemanfaatan limbah organik skala lokal. Infrastruktur pengolahan juga belum menjangkau daerah hulu secara optimal. Akibatnya, limbah kayu yang seharusnya dapat dimanfaatkan justru mengalir bebas dan menjadi beban tambahan bagi ekosistem pesisir. Ketika material kayu terakumulasi di pantai tanpa mekanisme penanganan, dampaknya tidak hanya bersifat ekologis seperti terganggunya habitat biota laut dan mikroorganisme pesisir tetapi juga mengganggu pariwisata dan mengancam kenyamanan serta keselamatan wisatawan. Menghadapi situasi ini, solusi adaptasi perlu diarahkan pada pengelolaan limbah kayu secara menyeluruh mulai dari hulu hingga hilir. Secara biologis, dekomposisi limbah kayu dapat ditingkatkan melalui pemanfaatan jamur lignolitik seperti *Pestalotiopsis sp.* yang memiliki kemampuan mendegradasi lignin dan selulosa secara efisien [43], [44]. Pendekatan ini dapat diterapkan dalam skala rumah tangga maupun komunal sebagai bagian dari sistem pengomposan berbasis biomassa lokal. Selain itu, pemulihan vegetasi riparian di sepanjang sungai berfungsi sebagai penghalang alami yang dapat mengurangi aliran material kayu dari daratan ke laut [45].

Dari aspek teknis-fisik, pemanfaatan teknologi *floating boom* di muara sungai dapat mencegah masuknya sampah kayu ke laut, sebagaimana telah diterapkan di beberapa negara Asia Tenggara. Teknologi ini penting dalam konteks adaptasi iklim karena berfungsi sebagai penghalang awal terhadap arus limpasan ekstrem saat curah hujan tinggi. Pada level pemrosesan akhir, pendekatan kimia seperti pirolisis memungkinkan konversi limbah kayu menjadi biochar atau bahan bakar cair, yang mendukung strategi energi terbarukan dan pertanian berkelanjutan. Alternatif lain adalah penggunaan limbah kayu sebagai bahan baku untuk produk kayu-komposit (*wood plastic composite*), yang dapat diproduksi melalui pencampuran kayu dan plastik daur ulang untuk pembuatan produk industri dan konstruksi. Keterpaduan antara pendekatan biologis, fisik, dan kimia ini harus ditopang oleh kebijakan daerah yang mendorong pengelolaan limbah berbasis sumber, termasuk program insentif bagi industri daur ulang biomassa serta penetapan kawasan penyangga hijau di wilayah aliran sungai. Pemerintah daerah perlu menggunakan data komposisi sampah sebagai dasar untuk perencanaan pengelolaan limbah terintegrasi. Misalnya, kabupaten dengan komposisi sampah kayu tinggi harus difokuskan pada investasi teknologi pengolahan biomassa, sedangkan wilayah dengan dominasi sampah plastik perlu diperkuat pada sistem pemilahan dan pengurangan konsumsi plastik sekali pakai. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular yang tidak hanya mengurangi dampak lingkungan, tetapi juga membuka peluang ekonomi hijau dan inovasi teknologi lokal. Dengan merancang kebijakan berbasis bukti dan mendukung penerapan teknologi adaptif, Provinsi Bali dapat mengatasi permasalahan tumpukan sampah kayu yang secara musiman mencemari pantai dan laut. Hal ini juga akan memperkuat posisi Bali sebagai model pengelolaan pesisir yang tangguh terhadap perubahan iklim dan tekanan aktivitas antropogenik, serta mencerminkan komitmen kuat terhadap pembangunan pariwisata yang berkelanjutan.

4. Kesimpulan

Studi ini menunjukkan bahwa keberadaan sampah kayu yang terdampar di pesisir selatan Bali bukan sekadar hasil dari dinamika oseanografi atau arus laut musiman, melainkan cerminan langsung dari tekanan aktivitas antropogenik di daratan yang diperparah oleh dampak perubahan iklim. Komposisi sampah di berbagai kabupaten/kota di Provinsi Bali yang didominasi oleh limbah kayu dan ranting memperkuat hipotesis bahwa sebagian besar debris kayu di laut berasal dari sistem darat yang tidak terkelola secara optimal. Intensifikasi curah hujan, degradasi tutupan lahan, dan lemahnya sistem pengelolaan limbah organik di wilayah hulu telah memperbesar potensi limbah kayu untuk masuk ke sungai dan bermigrasi ke laut. Pengendalian limbah kayu sebagai bagian dari marine debris membutuhkan pendekatan adaptif yang mengintegrasikan teknologi biologis, fisik, dan kimia, mulai dari pemanfaatan mikroorganisme lignolitik untuk dekomposisi limbah, penerapan teknologi penahan di muara sungai, hingga konversi limbah kayu menjadi produk bernilai ekonomi melalui proses pirolisis atau komposit. Kebijakan pengelolaan sampah harus disusun berdasarkan data spasial komposisi sampah daerah, dengan mendorong sinergi antarwilayah dan melibatkan aktif masyarakat, sektor swasta, serta pemangku kepentingan lokal.

5. Referensi

- [1] C. Godswill and C. Gospel, "Impacts of Plastic Pollution on the Sustainability of Seafood Value Chain and Human Health," *Int. J. Adv. Acad. Res. / Sci.*, vol. 5, no. 11, pp. 2488–9849, 2019.
- [2] A. K. Mishra, J. Singh, and P. P. Mishra, "Microplastics in polar regions: An early warning to the world's pristine ecosystem," *Sci. Total Environ.*, vol. 784, p. 147149, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147149>.
- [3] M. B. Alfonso *et al.*, "Assessing threats, regulations, and strategies to abate plastic pollution in LAC beaches during COVID-19 pandemic," *Ocean Coast. Manag.*, vol. 208, p. 105613, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105613>.
- [4] I. W. K. Suryawan, I. M. J. Sianipar, and C.-H. Lee, "Community importance-performance preferences and policy adaptiveness in marine debris management: A case study from the Komodo Subdistrict, Indonesia," *Mar. Policy*, vol. 174, p. 106592, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2025.106592>.
- [5] I. W. K. Suryawan and C.-H. Lee, "Importance-performance dynamics and willingness to pay in coastal areas for climate-adaptive marine debris management," *Reg. Stud. Mar. Sci.*, p. 103596, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103596>.
- [6] N. Ulhasanah *et al.*, "Exploratory factors in community-based adaptation strategies for managing marine microplastics," *Reg. Stud. Mar. Sci.*, vol. 82, p. 104015, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104015>.
- [7] S. Suhardono, T. T. T. Phan, C.-H. Lee, and I. W. K. Suryawan, "Design strategies and willingness to pay for circular economy service policies in sustainable tourism," *Environ. Challenges*, p. 101081, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101081>.
- [8] J. Jambeck *et al.*, "the Ocean: the Ocean.," *Mar. Pollut.*, vol. 347, no. 6223, pp. 768-, 2015, [Online]. Available: <https://science.sciencemag.org/CONTENT/347/6223/768.abstract>
- [9] M. M. Sari *et al.*, "Plastic pollution in the surface water in Jakarta, Indonesia," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 182, p. 114023, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114023>.
- [10] N. Ulhasanah *et al.*, "Characterization of Microplastics in Jakarta's Urban Downstream and Estuary Water Bodies," *Ecol. Eng. Environ. Technol.*, vol. 25, no. 11, pp. 260–273, 2024, doi: [10.12912/27197050/192678](https://doi.org/10.12912/27197050/192678).
- [11] M. Wajdi, R. Christiani, N. G. A. K. T. Purnama, K. Novitriana, N. P. A. S. Putri, and K. A. D. Putri, "Hidden beauty of honeymoon beach: a potential attraction for tourists (a review of a tourism object)," *J. Commer. Manag. Tour. Stud.*, vol. 2, no. 1, pp. 42–47, 2023.
- [12] K. Maclean, E. A. Weideman, V. Perold, and P. G. Ryan, "Buoyancy affects stranding rate and dispersal distance of floating litter entering the sea from river mouths," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 173, p. 113028, 2021.
- [13] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, "Sistem informasi Pengelolaan Sampah Nasional." [Online]. Available: <http://sipsn.menlhk.go.id>
- [14] N. Annisa, H. Prasetya, and Q. Sholihah, "Potential of carbonized rice husk as a filter media rain garden to decrease the turbidity of water and Coli bacteria in the Stormwater Runoff. a review of current research," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1011, no. 1, p. 12013, 2021, doi: [10.1088/1757-899X/1011/1/012013](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1011/1/012013).
- [15] I. W. K. Suryawan, S. Suhardono, V. V. Nguyen, and C.-H. Lee, "Importance-Performance Evaluation of Coral Reef Conservation in Advancing the Bioeconomy of Marine Tourism in Bali, Indonesia," *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.*, vol. 35, no. 3, p. e70085, Mar. 2025, doi: <https://doi.org/10.1002/aqc.70085>.
- [16] E. S. Sofiyah, S. Suhardono, B. Ridhosari, A. D. Nastiti, and I. W. K. Suryawan, "Community Participation in Urban Sanitation Programs at Koja, Jakarta, Indonesia," *J. Kesehat. Masy.*, vol. 20, no. 3, pp. 619–632, 2025.
- [17] E. S. Sofiyah, B. Ridhosari, S. Suhardono, C.-H. Lee, and I. W. K. Suryawan, "Impact of COVID-19 on Subjective Well-being and Community Importance-Performance in Sanitation Programs in Jakarta, Indonesia," in *Forum Geografi*, 2025, pp. 64–78.
- [18] A. Rahman, I. W. K. Suryawan, S. Suhardono, V. V. Nguyen, and C.-H. Lee, "Determinants of electric vehicle adoption in urban and peri-urban areas," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 85, p. 101664, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2025.101664>.
- [19] B.-C. Yang, C.-H. Lee, and I. W. Koko Suryawan, "Consumers' willingness to pay and importance-performance gaps for resilient e-waste management in Taiwan," *J. Clean. Prod.*, p. 144313, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144313>.

- [20] S. Suhardono, C.-H. Lee, and I. W. K. Suryawan, "Valuation of marine integrated disaster management amidst global warming in Southern Coast of Java, Indonesia," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 211, p. 117446, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117446>.
- [21] D. Porshnov, V. Ozols, L. Ansone-Bertina, J. Burlakovs, and M. Klavins, "Thermal decomposition study of major refuse derived fuel components," *Energy Procedia*, vol. 147, pp. 48–53, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.032>.
- [22] D. N. Rasquinha, "Manning the mangroves: gender, regional identities, and social history shape mangrove forest dependence and governance," *Ecol. Soc.*, vol. 29, no. 1, 2024, doi: 10.5751/ES-14809-290117.
- [23] H. Rahimi, M. L. Sattler, M. D. S. Hossain, and J. L. M. Rodrigues, "Boosting landfill gas production from lignin-containing wastes via termite hindgut microorganism," *Waste Manag.*, vol. 105, pp. 299–308, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.007>.
- [24] S. Suhardono, C.-H. Lee, and I. W. K. Suryawan, "Trends in citizen influencing willingness to participate in marine debris management and social well-being in Bali metropolitan, Indonesia," *Urban Gov.*, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ugj.2024.12.005>.
- [25] I. W. K. Suryawan and C.-H. Lee, "Green transition management: The key role of community participation in developing resilient waste management policies for coastal and inland communities," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2025, doi: 10.1007/s11356-025-36185-x.
- [26] I. W. K. Suryawan, S. Suhardono, and C.-H. Lee, "Boosting beach clean-up participation through community resilience hypothetical scenarios," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 207, 2024.
- [27] N. Akhtar, M. I. Syakir Ishak, S. A. Bhawani, and K. Umar, "Various Natural and Anthropogenic Factors Responsible for Water Quality Degradation: A Review," 2021. doi: 10.3390/w13192660.
- [28] D. Deb, P. Schneider, Z. Dudayev, A. Emon, S. S. Areng, and M. M. Mozumder, "Perceptions of Urban Pollution of River Dependent Rural Communities and Their Impact: A Case Study in Bangladesh," 2021. doi: 10.3390/su132413959.
- [29] P. Astawa, "Seasonal Waste Management in the Southern Coasts of Bali, Indonesia," *J. Indones. Sustain. Dev. Plan.*, vol. 3, no. 1, pp. 95–100, 2022.
- [30] J. W. Tuahatu, Y. A. Noya, and G. D. Manuputty, "Plastic pollution on the beaches of outer Ambon Bay," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 584, no. 1, p. 12058, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/584/1/012058.
- [31] A. R. Hastuti, F. Yulianda, and Y. Wardiatno, "Distribusi spasial sampah laut di ekosistem mangrove Pantai Indah Kapuk, Jakarta," *Bonorowo Wetl.*, vol. 4, no. 2, pp. 94–107, 2014, doi: 10.13057/bonorowo/w040203.
- [32] J. S. Silva-Cavalcanti, J. D. B. Silva, E. J. de França, M. C. B. de Araújo, and F. Gusmão, "Microplastics ingestion by a common tropical freshwater fishing resource," *Environ. Pollut.*, vol. 221, pp. 218–226, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.11.068>.
- [33] N. P. Purba *et al.*, "Marine debris in Indonesia: A review of research and status," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 146, pp. 134–144, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.05.057>.
- [34] S. Lincoln *et al.*, "Marine litter and climate change: Inextricably connected threats to the world's oceans," *Sci. Total Environ.*, vol. 837, p. 155709, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155709>.
- [35] S. Lincoln *et al.*, "A regional review of marine and coastal impacts of climate change on the ROPME sea area," *Sustainability*, vol. 13, no. 24, p. 13810, 2021.
- [36] A. Gkanasos *et al.*, "Stopping macroplastic and microplastic pollution at source by installing novel technologies in river estuaries and waste water treatment plants: the CLAIM project," *Front. Mar. Sci.*, vol. 8, p. 738876, 2021.
- [37] M. He, Z. Xu, Y. Sun, P. S. Chan, I. Lui, and D. C. W. Tsang, "Critical impacts of pyrolysis conditions and activation methods on application-oriented production of wood waste-derived biochar," *Bioresour. Technol.*, vol. 341, p. 125811, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125811>.
- [38] E. C. Emenike *et al.*, "Advancing the circular economy through the thermochemical conversion of waste to biochar: a review on sawdust waste-derived fuel," *Biofuels*, vol. 15, no. 4, pp. 433–447, Apr. 2024, doi: 10.1080/17597269.2023.2255007.
- [39] A. Maaoui *et al.*, "Assessment of pine wood biomass wastes valorization by pyrolysis with focus on fast pyrolysis biochar production," *J. Energy Inst.*, vol. 108, p. 101242, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101242>.
- [40] M. J. Ahmed *et al.*, "Lignocellulosic bioplastics in sustainable packaging – Recent developments in

- materials design and processing: A comprehensive review,” *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 41, p. e01077, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e01077>.
- [41] M. M. Alam, A. Greco, Z. Rajabimashhadi, and C. Esposito Corcione, “Efficient and environmentally friendly techniques for extracting lignin from lignocellulose biomass and subsequent uses: A review,” *Clean. Mater.*, vol. 13, p. 100253, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100253>.
- [42] I. Utama, I. N. Suardhana, I. G. Sutarya, and N. P. D. Krismawintari, “Assessing the impacts of overtourism in Bali: Environmental, socio-cultural, and economic perspectives on sustainable tourism,” *Tour. Divers. Dyn.*, vol. 1, no. 2, pp. 10–56578, 2024.
- [43] S. Pérez-Contreras, D. A. Avalos-de la Cruz, M. A. Lizardi-Jiménez, J. A. Herrera-Corredor, O. Baltazar-Bernal, and R. Hernández-Martínez, “Production of Ligninolytic and Cellulolytic Fungal Enzymes for Agro-Industrial Waste Valorization: Trends and Applicability,” 2025. doi: 10.3390/catal15010030.
- [44] A. D. Behera and S. Das, “Ecological insights and potential application of marine filamentous fungi in environmental restoration,” *Rev. Environ. Sci. Bio/Technology*, vol. 22, no. 2, pp. 281–318, 2023, doi: 10.1007/s11157-023-09655-2.
- [45] M. Mohan *et al.*, “Restoring Riparian Ecosystems During the UN-Decade on Ecosystem Restoration: A Global Perspective,” *Anthr. Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 42–61, 2022, doi: 10.1007/s44177-022-00009-1.