

**STRATEGI RESTORASI LAMUN DALAM EKOSISTEM KARBON BIRU
SEBAGAI UPAYA PERLINDUNGAN LINGKUNGAN**
*(Seagrass Restoration Strategy in Blue Carbon Ecosystems as an Environmental
Protection Effort)*

Rachel Palupi*, Nabila Zahra Sukmaputri, dan Sufadlan Nugraha

¹Universitas Pendidikan Indonesia, Sistem Informasi Kelautan, Jl. Dr. Setiabudi
No.229, Isola, Kec. Sukasari, Kota Bandung, Jawa Barat 40154, Indonesia
e-mail: rachelpalupi@upi.edu

ABSTRACT

Blue carbon ecosystems are coastal and marine ecosystems that can absorb, store and release carbon and one type is seagrass which can play a role in absorbing and storing carbon reserves, but the ability of our seagrass ecosystem to face climate change is not yet running optimally, this is caused by degradation from human activities. So there are several efforts to minimize seagrass protection, one of which is conservation. Seagrass conservation is needed as an effort to implement the 13th and 14th urgency of SDG's (Sustainable Development Goals). Seagrass conservation efforts have the potential to make a positive contribution to the improvement and sustainability of the climate and marine ecosystem, which in turn will support the preservation of the natural environment for future generations. This research uses a literature review method (literature review) with several stages in it such as finding problem formulation, data collection, data analysis, variable classification and research parameters and conclusions. The aim of this research is to examine seagrass conservation case studies and redesign seagrass conservation planning or seagrass restoration strategies. Seagrass restoration strategies in blue carbon ecosystems are a very important solution for environmental protection. Collaboration between researchers, government and local communities is very necessary in terms of sustainable seagrass management. The use of VIS sensors as well as VIS-NIR and ensemble models is very necessary because they can help in predicting, monitoring and making decisions as a solution for environmental protection.

Keywords: *blue carbon, conservation, degradation, restoration, seagrass*

ABSTRAK

Ekosistem karbon biru adalah ekosistem pesisir dan laut yang dapat menyerap, menyimpan, dan melepaskan karbon dan salah satu jenisnya adalah lamun yang dapat berperan dalam penyerapan dan penyimpanan cadangan karbon, namun kemampuan dari ekosistem lamun kita saat menghadapi perubahan iklim belum berjalan secara optimal, hal tersebut disebabkan oleh degradasi aktivitas manusia. Maka ada beberapa upaya untuk meminimalisir perlindungan lamun salah satunya ialah dengan melakukan konservasi. Konservasi lamun diperlukan sebagai upaya mengimplementasikan urgensi ke 13 dan 14 SDG's (*Sustainable Development Goals*). Upaya konservasi lamun berpotensi untuk memberikan kontribusi positif terhadap perbaikan dan keberlanjutan

iklim serta ekosistem laut, yang pada gilirannya akan mendukung pelestarian lingkungan alam bagi generasi mendatang. Penelitian ini menggunakan metode kajian pustaka (*literature review*) dengan beberapa tahapan di dalamnya seperti mencari rumusan masalah, pengumpulan data, analisis data, klasifikasi variabel dan parameter penelitian dan kesimpulan. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengkaji studi kasus konservasi lamun dan merancang kembali perencanaan konservasi lamun atau strategi restorasi lamun. Strategi restorasi lamun pada ekosistem karbon biru adalah solusi yang sangat penting bagi perlindungan lingkungan. Kerjasama antara peneliti, pemerintah serta masyarakat lokal sangat diperlukan dalam hal pengelolaan lamun berkelanjutan. Penggunaan sensor VIS juga VIS-NIR dan model ansambel sangat diperlukan sebab dapat membantu dalam hal memprediksi, memantau juga mengambil keputusan sebagai solusi perlindungan lingkungan.

Kata kunci: karbon biru, konservasi, degradasi, restorasi, lamun

PENDAHULUAN

Bumi mengalami perbedaan suhu secara drastis, bahkan bencana alam pun seringkali terjadi. Bencana merupakan sekumpulan peristiwa yang dapat mengancam dan mengganggu kehidupan manusia yang disebabkan oleh faktor alam maupun non alam (Maoleni, *et.al.*, 2021). Salah satu bencana non alam yang berdampak besar bagi kehidupan individu secara jangka panjang yaitu pemanasan global. Pemanasan global ditandai dengan kenaikan suhu rata-rata bumi dan diakibatkan oleh peningkatan gas rumah kaca seperti CO₂, metana (CH₄), uap air, dan N₂O. Emisi gas rumah kaca sendiri merupakan buah dari aktivitas manusia yang tidak memikirkan kelestarian alam, beberapa diantaranya seperti penggunaan bahan bakar fosil, penggunaan alat atau benda yang boros energi, pembuangan limbah industri yang tidak diolah dengan baik, alih fungsi lahan, hingga perusakan ekosistem karbon biru seperti lamun secara besar-besaran. Menurut Anzani, *et.al.*, (2019), jika ekosistem mengalami degradasi, maka akan berakibat pada hilangnya keanekaragaman hayati. Emisi gas rumah kaca harus diturunkan untuk mengatasi tantangan perubahan iklim global (Maulana, 2023).

Salah satu cara pemerintah dalam merespon peristiwa pemanasan global ini yaitu dengan melakukan kampanye atau sosialisasi mengenai program pemerintah dan organisasi internasional yaitu program netralitas karbon. Ekosistem karbon biru adalah ekosistem pesisir dan laut yang dapat menyerap, menyimpan, dan melepaskan karbon (Kompas, 2022). Dilansir dari laman *Indonesia Ocean Justice Initiative*, ekosistem ini terdiri dari beberapa jenis, seperti mangrove, padang lamun, dan rawa payau. Padang

lamun sendiri memiliki banyak fungsi penting di wilayah pesisir, seperti melindungi garis pantai dari abrasi, menjadi habitat flora dan fauna lokal, dan sebagai sumber pendapatan bagi ekonomi lokal. Selain itu, lamun juga berfungsi sebagai penyeimbang karbon utama karena mampu menyerap dan menyimpan karbon sebesar 55% (Zurba. N, 2018).

Melalui Perjanjian Iklim Paris telah ditetapkan oleh dunia untuk target yang harus dipenuhi sebesar 1,5°C, untuk memenuhi target tersebut diperlukannya penyerapan karbon yang lebih efektif guna untuk tambahan dalam upaya pengurangan emisi yang sudah ada. Upaya yang dapat diterapkan berupa perlindungan, restorasi dan juga konservasi yang merupakan solusi penting dikarenakan daya serap karbonnya jauh lebih kuat daripada daya serap hutan (Seddon. N *et al.*, 2020). Meskipun ekosistem lamun dapat berperan dalam penyerapan dan penyimpanan cadangan karbon, kemampuan dari ekosistem pesisir kita saat menghadapi perubahan iklim belum berjalan secara optimal (Perpustakaan Emil Salim, 2018). Hal tersebut disebabkan oleh degradasi aktivitas manusia. Beberapa penyebab dari fenomena tersebut adalah reklamasi pantai, penangkapan ikan secara berlebihan, penambangan pasir dan juga sampah ataupun kualitas air yang buruk. Menurut Stankovic *et al.*, (2021) Dilaporkan bahwa luasan ekosistem lamun secara global mengalami penurunan sebesar 2.82% per tahun dan apabila lamun tidak dikelola dengan baik, maka akan terjadi kerusakan lamun secara global.

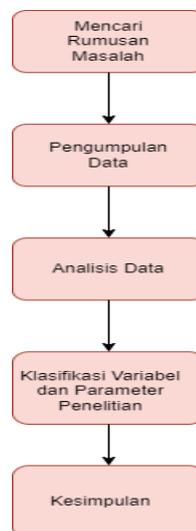
Pemerintah membangun upaya sebagai skala nasional untuk melindungi padang lamun berupa Kawasan Perlindungan Laut atau yang sering disebut sebagai KPL. Menurut Huliselan, N. *et al.*, (2023), beberapa wilayah kawasan perlindungan laut telah berhasil meningkatkan luas padang lamun, namun masih ada beberapa wilayah yang belum bisa menghentikan degradasi luasan padang lamun. Sebagai upaya untuk meminimalisir perlindungan lamun di kawasan konservasi ada beberapa langkah yang dapat diambil oleh KPL baik dari masyarakat setempat maupun pemerintah. Langkah pertama bisa dimulai dari kampanye publik sebagai sarana untuk menyampaikan informasi guna meningkatkan kesadaran masyarakat tentang ekosistem lamun. Kedua pemerintah atau KPL melakukan pemantauan dan pengawasan secara rutin. Menurut Irawan (2019) contoh dari pemantauan ekosistem pesisir laut yang baik yaitu di Taman Wakatobi Nasional yang mana ia berhasil dalam melibatkan masyarakat setempat juga meningkatkan kesadaran masyarakat guna untuk melindungi ekosistem pesisir laut, pun

kegiatan mereka juga banyak dibantu oleh proyek ilmiah dan LSM.

Konservasi lamun diperlukan sebagai upaya mengimplementasikan urgensi SDG's (*Sustainable Development Goals*) mengenai poin ke 13 dan 14 yaitu penanganan perubahan iklim dan ekosistem lautan. Searah dengan poin SDG's tersebut, pemerintah pun menggalakan Kebijakan Ekonomi Biru di poin kedua mengenai perluasan wilayah konservasi laut. Tujuan dari riset ini yaitu untuk mengkaji studi kasus konservasi lamun dan merancang kembali perencanaan konservasi lamun.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kajian pustaka (*literature review*) sehingga dalam pengumpulan datanya diambil dari berbagai sumber seperti buku, jurnal, ataupun publikasi terpercaya lainnya. Studi pustaka sesuai digunakan dalam penelitian ini yang berfokus dalam menganalisis, mengklasifikasi, dan menyimpulkan referensi ilmiah untuk mendapatkan hasil identifikasi urgensi penelitian. Tahapan dari *literature review* adalah sebagai berikut:



Gambar 1. Metode Penelitian (Sumber: Peneliti, 2023)

1. Mencari Rumusan Masalah

Pada tahap ini, peneliti menyusun rumusan masalah yang dapat menjadi batasan permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian. Rumusan masalah yang akan diteliti dituangkan dalam pendahuluan. Penelitian ini akan mengkaji permasalahan konservasi salah satu ekosistem biru, yaitu lamun.

2. Pengumpulan Data

Tahap pengumpulan data dilakukan dengan melakukan literatur pada penelitian terdahulu di dalam jurnal dan buku-buku yang relevan agar kajian teori riset dapat lebih kaya. Di dalam pengumpulan data, peneliti mengambil teori yang memiliki relevansi dengan judul dan urgensi penelitian strategi restorasi lamun ini.

3. Analisis Data

Tahap analisis data yaitu tahap mencatat dan mengolah bahan penelitian berdasarkan referensi yang telah ditemukan dari sumber-sumber sebelumnya.

4. Klasifikasi Variabel dan Parameter Penelitian

Pada tahap ini dilakukan pengelompokkan variabel dari data yang sudah ditemukan, begitu pun dengan parameter penelitian.

5. Kesimpulan

Setelah dianalisis dan diklasifikasikan, maka peneliti akan menarik kesimpulan. Kesimpulan ditulis berdasarkan hasil penelitian dan jawaban dari permasalahan riset. Berdasarkan tahapan di atas, maka variabel, indikator, dan parameter dari “Strategi Restorasi Lamun Dalam Ekosistem Karbon Biru Sebagai Upaya Perlindungan Lingkungan”.

Tabel 1. Variabel, Indikator, dan Parameter Riset

No	Sumber	Uraian	Variabel	Indikator	Parameter
1	Nabil Zurba (2018)	Peran lamun sebagai Blue Carbon Sink	Pengelolaan Lamun	Penurunan efek gas rumah kaca	-Mengembangkan inovasi pembuatan kertas berbahan dasar lamun -Membangun sinergi antar stakeholder dengan mendukung produk kertas lamun ramah lingkungan -perencanaan ekowisata yang baik

2	Sari et.al. (2019)	Ekosistem padang lamun memiliki peranan penting dalam menunjang kehidupan dan perkembangan biota laut di lautan yang dangkal.	Kesehatan padang lamun	-Keberhasilan upaya melestarikan padang lamun
3	Chand & Bollard (2022)	Mengembangkan teknik deteksi perubahan musiman skala besar berkaitan dengan skala variabilitas, sehingga berhubungan pula dengan distribusi suatu populasi.	Nilai kepadatan lamun	-Akurasi sensor VIS (spektrum tampak) -Akurasi sensor VIS+NIR (spektrum tampak dan inframerah dekat)

Kelimpahan ekosistem lamun

4	Marhayana & Bakti (2022)	Pola pemanfaatan dan permasalahan dari ekosistem lamun di Pantaarang-karangan, Kecamatan Bua, Kabupaten Luwu beserta solusi alternatif dari pengelolaan ekosistem lamun.	Tingkat kesehatan lamun	-Keberhasilan konservasi ekosistem lamun dan rehabilitasi
<hr/>				
5	He, et. al., 2022)	Model sebaran Lamun yang dapat mensimulasikan variabel masukan lingkungan	Pemetaan distribusi lamun	-Model ansambel -Analisis interaksi multifitur

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini, akan disajikan hasil studi kasus konservasi lamun yang telah diterapkan di beberapa wilayah di Indonesia, serta usulan perencanaan konservasi lamun yang baru. Penting untuk dicatat bahwa upaya konservasi lamun memiliki potensi untuk memberikan kontribusi positif terhadap perbaikan dan keberlanjutan iklim serta ekosistem laut, sehingga dapat membantu pengelolaan ekosistem laut secara lestari dan berkelanjutan.

A. Pengelolaan Lamun Sebagai Konservasi Karbon Biru

Lamun memiliki peran sebagai komoditi yang bermanfaat bagi masyarakat secara modern dan tradisional (Philips & Menez dalam Selfi, et. al. 2019). Lamun berperan dalam menyaring limbah, penstabil pantai dan obat-obatan. Selain itu, lamun merupakan bagian dari ekosistem biru yang dapat mengurangi risiko perubahan iklim. Emisi gas rumah kaca adalah dampak buruk dari aktivitas manusia yang tidak terkendali, misalnya yaitu kegiatan industri dan alih fungsi lahan.

Penebangan pohon secara intensif disebabkan oleh permintaan kebutuhan kertas dalam jumlah yang banyak. Apabila penebangan pohon tidak dikendalikan secara optimal, maka akan terjadi fenomena gundulnya hutan sampai hilangnya fungsi hutan. Melihat urgensi tersebut, lamun dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan kertas. Menurut Nabila Zurba (2018), bahan baku kertas yang semula kayu dapat diganti menjadi ekstrak dari lamun. Kertas lamun lebih unggul dari kertas konvensional karena lebih awet, lebih tahan air, dan ramah lingkungan. Sementara itu, penggunaan kertas lamun ini mendukung pemanfaatan ekosistem karbon biru karena lebih menghemat penggunaan energi.

Dalam mengelola produk inovasi kertas lamun secara berkelanjutan, diperlukan sinergi antar stakeholder. Cara menumbuhkan minat terhadap produk dapat dilakukan melalui kerja sama dari pemerintah, peneliti, pengusaha, masyarakat lokal, dan konsumen. Pemerintah dapat berperan dalam dukungan regulasi, insentif, sarana serta prasarana yang menunjang kegiatan produksi. Kemudian, peneliti dapat berkontribusi dengan memberikan hasil riset yang berkaitan dengan inovasi dan standar kualitas produk kertas lamun. Pengusaha pun dapat mengambil produk ini sebagai peluang bisnis yang dapat dikembangkan dan diproduksi lebih masif dengan mengolah produk kertas lamun

yang berkualitas, menguntungkan, dan memiliki daya saing. Selain itu, masyarakat lokal dapat berperan dalam kegiatan produksi kertas lamun dengan memanen, mengemas, dan menjual lamun secara berkelanjutan. Lalu target konsumen dapat diberikan persuasif untuk mengkonsumsi produk ramah lingkungan sehingga dapat membeli produk kertas lamun.

Pengelolaan lamun secara terukur dapat diwujudkan melalui perencanaan ekowisata yang matang. Ekowisata berfungsi untuk mengubah budaya yang berkaitan dengan lingkungan seperti kegiatan mempromosikan konsep daur ulang, efisiensi energi, dan menciptakan lapangan kerja bagi warga lokal (Nabil Zurba , 2018). Ekowisata dapat diartikan sebagai upaya dalam melestarikan ekosistem lamun sekaligus meningkatkan pendapatan masyarakat lokal. Ekowisata dapat menawarkan pengalaman wisata yang edukatif, menyenangkan, dan bertanggung jawab terhadap lingkungan. Beberapa contoh aktivitas ekowisata di kawasan lamun adalah *snorkeling*, *diving*, *kayaking*, *birdwatching*, dan pengamatan biota laut. Analisis daya dukung wisata dibutuhkan suatu kawasan agar kegiatan wisata di kawasan tersebut bisa menjadi kegiatan yang berkelanjutan (Pradhana, et. al. 2021) Perencanaan ekowisata yang baik harus memperhatikan empat aspek seperti berikut: (1) Kerjasama antara pemerintah dengan lembaga non profit untuk melaksanakan pendidikan bagi masyarakat, pengawasan terhadap lingkungan yang sehat dari pengunjung serta penerapan dari perencanaan perlindungan habitat, (2) Identifikasi daya dukung sosial dan daya dukung ekologis, (3) Penetapan duta lingkungan yang bertujuan untuk mempromosikan Sesuatu atau yang berhubungan dengan menjaga lingkungan, dan (4)Inovasi dari pengusaha setempat agar pasar ekowisata bertambah.

Selain empat prinsip di atas, diperlukan hal-hal yang dipertimbangkan untuk menunjang keberhasilan ekowisata, yaitu:

1. Sebagian besar laba yang didapatkan, dikembalikan terhadap usaha konservasi.
2. Peranan penduduk lokal, mulai dari masukan, dukungan dan keuntungan yang didapatkan.
3. Tidak menimbulkan dampak kerusakan ekologis dan sosial yang baru.
4. Pendekatan secara ilmiah dalam pengamatan kehidupan alami agar menjaga keamanan manusia dan hewan.
5. Nilai-nilai budaya penduduk lokal.
6. Kepuasan bagi pengunjung.

B. Kelimpahan Ekosistem Lamun

Berdasarkan literatur yang telah peneliti lakukan pada jurnal “Kajian Pengelolaan dan Pola Pemanfaatan Ekosistem Lamun Perairan Pantai Teluk Bone Kabupaten Luwu”, kerusakan ekosistem lamun yang dialami Pantai Karang-Karang diakibatkan karena beberapa kegiatan manusia, diantaranya yaitu pembuangan sampah, budidaya rumput laut juga pelepasan baling-baling perahu dan jangkar. Kegiatan-kegiatan tersebut berdampak kepada penurunan persentase tutupan lamun juga menyebabkan menurunnya organisme seperti ikan-ikan yang bergantung oleh lamun sebagai sumber makanan juga habitatnya.

Menurut Syarifuddin, *et al.* (2022) pendekatan pengelolaan dalam mengatasi masalah-masalah tersebut bisa melalui konservasi dan rehabilitasi ekosistem lamun. Konservasi ekosistem lamun yang diterapkan pada Pantai Karang-Karang diantaranya, yaitu penyuluhan dan sosialisasi sebagai penyadaran masyarakat mengenai pentingnya ekosistem lamun terkait fungsi maupun peran ekosistem lamun, upaya menjaga ekosistem lamun agar lebih lestari, mengembangkan DPEL atau Daerah Perlindungan Ekosistem lamun sebagai sarana dalam melindungi serta mempertahankan ekosistem lamun dari berbagai hal-hal yang merusak.

Kemudian, rehabilitasi yang diterapkan pada studi kasus ini menggunakan dua pendekatan yakni rehabilitasi lunak juga rehabilitasi keras. Rehabilitasi lunak bertujuan guna meningkatkan kesadaran manusia dalam menjaga kelestarian ekosistem lamun, sehingga metode rehabilitasi yang diterapkan pada masyarakat berupa kampanye penyadaran dan pengembangan mata pencaharian alternatif, sedangkan untuk rehabilitasi kerasnya dilakukan dengan observasi ke lapang, contohnya dengan melakukan transplantasi lamun. Transplantasi lamun yang diterapkan melalui cara mentransfer lamun-lamun yang masih sehat dari wilayah yang rusak ke wilayah yang lebih baik

Ekosistem lamun dan rehabilitasi ekosistem lamun sangatlah penting, sebab hal tersebut dapat menjaga keberlanjutan dari sumberdaya perikanan serta kehidupan masyarakat yang masih bergantung dengan ekosistem lamun. Dalam studi kasus di Pantai Karang-Karang untuk meninjau keberhasilan konservasi, faktor-faktor yang bisa mempengaruhi keberhasilan konservasi diantaranya seperti, kualitas substrat dan kondisi perairan yang baik parameternya. Demi menjaga ekosistem lamun secara berkelanjutan, pengelolaan setelah konservasi dan rehabilitasi harus dilakukan dengan melakukan evaluasi ataupun monitoring secara berkala, hal ini dilakukan sebagai sarana dalam

menunjang perkembangan ekosistem lamun setelah dilakukannya konservasi dan rehabilitasi.

Salah satu cara dalam memaksimalkan monitoring bisa dilakukan dengan memanfaatkan teknologi terkini. Sensor VIS (*visible*) adalah sensor cahaya berbasis spektrum visual atau yang terlihat. Sensor ini adalah jenis sensor optik yang dirancang untuk mendeteksi cahaya yang terlihat oleh mata manusia. Sensor VIS di zaman sekarang sering digunakan dalam berbagai pengaplikasian, namun dalam riset ini, sensor VIS memiliki peran yang penting dalam pemantauan dan restorasi ekosistem lamun dengan memberikan perlindungan lingkungan. Akurasi sensor ini sangat vital dalam mengukur kondisi lamun dan perubahan lingkungan seiring waktu. Sensor VIS mampu mengukur tingkat pencahayaan dan warna air, yang merupakan indikator kunci kesehatan ekosistem lamun.

Data yang akurat dan dapat diandalkan dari sensor ini akan menjadi dasar yang kuat dalam merencanakan dan melaksanakan strategi restorasi lamun yang efektif di dalam ekosistem karbon biru. Data ini juga akan membantu dalam memantau perubahan kondisi lingkungan dan perkembangan lamun secara tepat waktu, yang esensial untuk menjaga kelestarian ekosistem ini dan pelestarian karbon biru. Hasil akurasi sensor VIS akan menjadi landasan penting dalam perencanaan dan pelaksanaan strategi restorasi lamun dan upaya perlindungan lingkungan yang berkelanjutan dalam ekosistem karbon biru. Berdasarkan tabel penilaian akurasi klasifikasi lamun seri waktu musiman untuk VIS dan VIS+NIR orthomosaic, termasuk akurasi pengguna “*U-acc*” dan akurasi produsen “*P-acc*,” dan keseluruhan akurasi untuk fitur yang diklasifikasikan versus data yang direferensikan (“Akurasi Keseluruhan”) dan koefisien Kappa yang diolah dalam penelitian Chand dan Bollard (2021) maka dengan menggunakan sensor VIS mampu memberikan akurasi data kebenaran dasar sebesar 90% serta memiliki jarak pengambilan sampel tanah yang lebih baik. Dengan demikian, penggunaan sensor VIS memiliki potensi besar dalam mendukung penelitian dan tindakan pelestarian lingkungan.

Selanjutnya ada sensor VIS-NIR sendiri adalah sensor yang telah digunakan untuk mengukur spektrum cahaya yang mencakup rentang visual (VIS) dan inframerah dekat (NIR), yang sangat relevan dalam mengidentifikasi dan memantau kesehatan lamun. Akurasi sensor ini menjadi fokus utama dalam memahami efektivitas strategi restorasi lamun dalam melestarikan ekosistem dan lingkungan. Penting untuk dicatat bahwa,

akurasi sensor VIS-NIR berfungsi untuk mengukur parameter ekosistem karbon biru, seperti kepadatan lamun dan kandungan karbon. Kedua hal tersebut adalah sesuatu yang krusial dalam mengevaluasi efektivitas strategi restorasi. Menurut Chand dan Bollard (2021) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa sensor VIS-NIR mampu memberikan data yang akurat, terutama dalam mengukur distribusi lamun dan kandungan karbon di ekosistem karbon biru. Analisis data pada penelitiannya menyatakan bahwa akurasi sensor ini mencapai tingkat yang memadai untuk mendukung strategi restorasi lamun yaitu 99%. Hasil ini membuktikan bahwa penggunaan sensor VIS-NIR dapat membantu dalam memonitor ekosistem karbon biru dengan lebih efektif, yang pada gilirannya berkontribusi pada upaya perlindungan lingkungan.

Monitoring yang efektif dapat dilaksanakan dengan memanfaatkan sensor dan salah satu bidang teknologi yang menunjang adalah *Machine Learning* (ML) (Ariawan, et.al., 2021). Model ansambel merupakan suatu penggabungan dari lima model *machine learning* yang berbeda-beda, lima diantaranya yaitu ada GAM (*Generalized Additive Model*), GLM (*Generalized Linear Model*), MARS (*Multivariate Adaptive Regression Splines*), MaxEnt (*Maximum Entropy*), dan SVM (*Support Vector Machine*), model ansambel juga menggunakan metode XAI (*explainable artificial intelligence*). Model ansambel digunakan sebagai sarana untuk memprediksi penyebaran dari potensial dan habitat untuk lamun dengan prediksi yang akurat, yang mana model ini dapat memberikan kesesuaian yang konsisten sesuai dengan kondisi di lapang yang sebenarnya. Model ansambel tersebut dapat memberitahukan mengenai faktor-faktor lingkungan yang dapat mempengaruhi akan persebaran dari lamun, sehingga dapat dimanfaatkan untuk mengembangkan pemahaman mengenai ekologi lamun juga membantu dalam hal pengambilan keputusan tentang konservasi juga restorasi habitat lamun (He, B., Zhao, Y., & Mao, W., 2022).

Model ansambel sendiri dapat digunakan dengan cara mengkombinasi hasil-hasil prediksi yang didapat dari model-model *machine learning* tersebut, sedangkan untuk hasil prediksi tersebut didapatkan melalui matriks evaluasi seperti, *omission rate*, *specificity*, *sensitivity*, kappa dan AUC (*Area Under Curve*), yang kemudian dari hasil tersebut dilakukannya integrasi guna sebagai pembentuk prediksi akhir dengan metode kombinasi yang sesuai. Secara general metode XAI yang digunakan sebagai sarana dalam menerangkan pentingnya suatu variabel lingkungan pada model persebaran lamun.

Metode XAI seperti *Shapley Value* (SHAP) juga *Partial Dependency Plot* (PDP) digunakan sebagai sarana dalam menggambarkan kontribusi pada variabel lingkungan terhadap efek interaksi juga hasil prediksi antara variabel-variabel yang beragam.

Model ansembel memiliki beberapa keunggulan dalam konteks mengatasi kerumitan dari model-model yang dihadapi pada variabel lingkungan yang berbeda, yang mana dengan menerapkannya model ansembel, interpretasi serta pemahaman kepada prinsip internal suatu model dapat ditingkatkan. Suatu pemahaman mengenai bagaimana penggabungan antar variabel lingkungan yang mempengaruhi suatu hasil prediksi penyebaran lamun didapatkan melalui analisis interaksi multifitur, yang mana jika kita dapat memahami interaksi antar variabel lingkungan tersebut maka kita juga dapat lebih memahami bagaimana perubahan nilai dari variabel lingkungan yang bisa mempengaruhi penyebaran lamun. Sehingga hal tersebut bisa dimanfaatkan dalam mengambil keputusan mengenai restorasi juga konservasi habitat lamun dengan bagaimana mempertimbangkan interaksi antar variabel lingkungan yang beragam.

Menurut He, *et al.* (2022) metode yang digunakan dalam penelitian mereka yaitu metode PDP atau *Partial Dependency Plot* dan SHAP atau *Shapley value* yang dapat digunakan dalam menggambarkan interaksi antar variabel lingkungan dan perubahan dari nilai variabel tersebut yang dapat mempengaruhi hasil prediksi. Langkah pertama yang mana metode SHAP ini dilakukan guna mengukur kontribusi dari masing-masing variabel lingkungan kepada hasil prediksi, yang mana dari metode ini dapat dapat menghasilkan nilai SHAP dalam setiap variabel yang menjelaskan seberapa besarnya kontribusi dari variabel tersebut kepada hasil prediksi. Dengan metode tersebut peneliti dapat mengidentifikasi variabel lingkungan yang paling signifikan pada saat memprediksi penyebaran lamun. Sehingga didapatkan hasil yang menunjukkan bahwasannya variabel tanah juga silikat memiliki kontribusi yang paling berpengaruh dalam mempengaruhi hasil prediksi.

Kemudian metode PDP dilakukan guna menganalisis interaksi antar variabel lingkungan. Metode ini dapat menjelaskan dari perubahan nilai variabel lingkungan yang dapat mempengaruhi hasil prediksi semuanya. Dari metode ini dapat dilihat bahwasannya gabungan nilai variabel lingkungan dapat mempengaruhi suatu hasil penyebaran lamun. Sehingga hasil menunjukkan bahwasannya interaksi antara variabel lingkungan bisa membuahkan hasil perubahan yang berpengaruh terhadap hasil prediksi. Contohnya

penggabungan tertentu dari suatu variabel tanah dengan variabel silikat yang mana bisa menghasilkan suatu efek negatif maupun positif terhadap penyebaran lamun.

KESIMPULAN

Strategi restorasi lamun dalam ekosistem karbon biru merupakan solusi yang sangat penting dalam upaya perlindungan lingkungan. Melalui konservasi lamun, dapat dilakukan upaya untuk mengimplementasikan urgensi *Sustainable Development Goals (SDGs)* terkait perubahan iklim dan ekosistem lautan. Dalam mengelola lamun sebagai konservasi karbon biru, diperlukan kerjasama antara peneliti, pemerintah, dan masyarakat lokal. Penggunaan sensor VIS dan VIS-NIR dalam pemantauan dan prediksi lamun juga sangat penting dalam mengambil keputusan sebagai solusi perlindungan lingkungan.

Dalam penelitian ini juga ditemukan bahwa model ansambel dapat digunakan sebagai algoritma *machine learning* yang efektif dalam memprediksi penyebaran dan habitat lamun dengan menggabungkan beberapa model *machine learning* yang berbeda untuk memberikan hasil prediksi yang akurat. Metode XAI (*Explainable Artificial Intelligence*) juga digunakan dalam menjelaskan pentingnya variabel lingkungan dalam model persebaran lamun. Dengan menggunakan model ansambel dan metode XAI, dapat diketahui faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi persebaran lamun, sehingga dapat membantu dalam pengambilan keputusan terkait konservasi dan restorasi habitat lamun. Hasil penelitian ini memberikan pemahaman yang lebih baik tentang ekologi lamun dan memberikan landasan yang kuat untuk upaya perlindungan lingkungan di ekosistem karbon biru.

DAFTAR PUSTAKA

- He, B., Zhao, Y., & Mao, W. (2022). Explainable artificial intelligence reveals environmental constraints in seagrass distribution. *Ecological Indicators*, 144, 109523.
- Huliselan, N. V., Tuapattinaja, M. A., Mamesah, J. A., & Tetelepta, J. M. (2023). KONEKTIVITAS KAWASAN KONSERVASI (TERUMBU KARANG,

- MANGROVE DAN LAMUN) DAN SUMBER DAYA IKAN. BLUE 101, 6145. Indonesia Ocean Justice Initiative (IOJI). (2023, January 30). *Perkuat Tata Kelola Ekosistem Karbon Biru di Indonesia*. Indonesia Ocean Justice Initiative. Retrieved October 25, 2023, from <https://oceanjusticeinitiative.org/2023/01/30/perkuat-tata-kelola-ekosistem-karbon-biru-di-indonesia/>
- Irawan, A. (2019, November 24). *Mengapa padang lamun di Kawasan Perlindungan Laut Indonesia masih terancam. Ini penjelasan ahli*. The Conversation. Retrieved October 25, 2023, from <https://theconversation.com/mengapa-padang-lamun-di-kawasan-perlindungan-laut-indonesia-masih-terancam-ini-penjelasan-ahli-127327>
- Maulana, P., Arifin, W. A., & Minsaris, L. O. A. (2023). *Mstimasi stok karbon tersimpan pada hutan mangrove di Paluh Kurau, Deli Serdang*. Journal of Scientech Research and Development, 5(2), 770-779. <https://doi.org/10.56670/jsrd.v5i2.254>
- Perpustakaan Emil Salim. (2018). *Perpustakaan Kementerian Lingkungan Hidup*. Perpustakaan Kementerian Lingkungan Hidup. Retrieved October 25, 2023, from http://perpustakaan.menlhk.go.id/pustaka/home/index.php?page=detail_news&newsid=605
- Pradhana, H. D., Endrawati, H., & Susanto, A. (2021). Analisis Kesesuaian Ekosistem Lamun Sebagai Pendukung Ekowisata bahari Pulau Panjang kabupaten jepara. Journal of Marine Research, 10(2), 213–224. <https://doi.org/10.14710/jmr.v10i2.30118>
- Seddon, N., Chausson, A., Berry, P., Girardin, C. A., Smith, A., & Turner, B. (2020). Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1794), 20190120.
- Syarifuddin, M., & Bhakti, F. K. (2022). Kajian Pengelolaan dan Pola Pemanfaatan Ekosistem Lamun Perairan Pantai Teluk Bone Kabupaten Luwu. *Fisheries Of Wallacea Journal*, 3(2), 91-100.
- Stankovic, M., Ambo-Rappe, R., Carly, F., Dangan-Galon, F., Fortes, M. D., Hossain, M. S., Kiswara, W., Van Luong, C., Minh-Thu, P., Mishra, A. K., Noiraksar, T., Nurdin, N., Panyawai, J., Rattanachot, E., Rozaimi, M., Soe Htun, U., & Prathep, A. (2021). Quantification of blue carbon in seagrass ecosystems of Southeast Asia and their potential for climate change mitigation. *Science of The Total Environment*,

783, 146858. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146858>

The Nature Conservancy. (n.d.). *Pendahuluan / Ketahanan Karang*. Reef Resilience Network. Retrieved October 25, 2023, from <https://reefresilience.org/id/management-strategies/blue-carbon/blue-carbon-introduction/>

Zurba, N. (2018). *Pengenalan Padang Lamun*. Jakarta: Penerbit Buku Kompas.