



Integrasi Bioakustik dan Sains Komputasi untuk Memetakan Komunikasi Mamalia Laut sebagai Upaya Konservasi Satwa Dilindungi di Samudera Tropis

Aji Priyambodo^{1*}, Hesti Ristanto²

^{1,2} Institut Teknologi dan Bisnis Indonesia

*Penulis Korespondensi: ajipro@gmail.com

Abstract. *This study aims to analyze the communication of marine mammals, especially whales and dolphins, through a bioacoustic approach combined with computational science as an effort to support conservation in the Tropical Ocean region. The focus of the location is on the Banda Sea, the Seram Sea, and the tropical Pacific region which are important migration routes for marine mammals. Data were obtained from underwater sound recordings using hydrophones, accompanied by visual observations to validate the behavior and existence of species. The analysis is carried out through several stages, including signal pre-processing with noise filtering and sound segmentation, spectral analysis using Fast Fourier Transform (FFT), as well as the creation of a spectrogram to visualize vocalization patterns. Machine learning algorithms such as Support Vector Machine (SVM) are used to classify interspecies voices, while deep learning approaches are applied to identify more complex communication patterns, including dialect variations. The results showed that whales produced low-frequency vocalizations (20–200 Hz) for long-distance communication, while dolphins used high-frequency clicks and whistles (5–20 kHz) for echolocation and social interaction. The integration of bioacoustics and artificial intelligence improves the accuracy of sound classification by more than 90%. These findings confirm the effectiveness of computational-based non-invasive methods in monitoring the presence and behavior of marine mammals and provide a scientific basis for sustainable conservation.*

Keywords: *Bioacoustics; Marine Mammals; Computational Science; Artificial Intelligence; Conservation.*

Abstrak. Penelitian ini bertujuan menganalisis komunikasi mamalia laut, khususnya paus dan lumba-lumba, melalui pendekatan bioakustik yang dipadukan dengan sains komputasi sebagai upaya mendukung konservasi di kawasan Samudera Tropis. Fokus lokasi berada pada Laut Banda, Laut Seram, dan wilayah Pasifik tropis yang merupakan jalur migrasi penting mamalia laut. Data diperoleh dari rekaman suara bawah laut menggunakan hydrophone, disertai observasi visual untuk memvalidasi perilaku dan keberadaan spesies. Analisis dilakukan melalui beberapa tahap, termasuk pra-pemrosesan sinyal dengan filtering noise dan segmentasi suara, analisis spektral menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT), serta pembuatan spectrogram untuk memvisualisasikan pola vokalisasi. Algoritma machine learning seperti *Support Vector Machine* (SVM) digunakan untuk mengklasifikasikan suara antarspesies, sedangkan pendekatan deep learning diterapkan untuk mengidentifikasi pola komunikasi yang lebih kompleks, termasuk variasi dialek. Hasil menunjukkan bahwa paus menghasilkan vokalisasi berfrekuensi rendah (20–200 Hz) untuk komunikasi jarak jauh, sedangkan lumba-lumba menggunakan klik dan peluit berfrekuensi tinggi (5–20 kHz) untuk ekolokasi dan interaksi sosial. Integrasi bioakustik dan kecerdasan buatan meningkatkan akurasi klasifikasi suara hingga lebih dari 90%. Temuan ini menegaskan efektivitas metode non-invasif berbasis komputasi dalam memantau keberadaan dan perilaku mamalia laut serta memberikan dasar ilmiah bagi konservasi berkelanjutan.

Kata Kunci: Bioakustik; Mamalia Laut; Sains Komputasi; Kecerdasan Buatan; Konservasi.

1. PENDAHULUAN

Bioakustik merupakan bidang interdisipliner yang menggabungkan biologi dan akustik untuk mempelajari produksi, penerimaan, serta penggunaan suara oleh hewan, termasuk mamalia laut (Tyack & Adamczak, 2019). Mamalia laut seperti paus dan lumba-lumba sangat bergantung pada komunikasi akustik untuk navigasi, interaksi sosial, hingga deteksi mangsa (Reckendorf, Seidelin, & Wahlberg, 2023). Kompleksitas vokalisasi mereka menunjukkan

pentingnya suara dalam menjaga kelangsungan hidup di lingkungan laut yang dinamis dan sulit dipantau dengan metode observasi visual.

Perkembangan bioakustik telah menghadirkan metode pemantauan non-invasif yang memungkinkan peneliti mengidentifikasi keberadaan, distribusi, dan perilaku spesies secara real-time (Changapur, Seema, & Sowmya, 2023). Pemantauan akustik pasif (Passive Acoustic Monitoring/PAM), misalnya, telah terbukti efektif untuk mengkaji distribusi cetacea di perairan tropis meskipun kondisi cuaca buruk atau keterbatasan jarak pandang (Frasier et al., 2021). Pendekatan ini memperluas cakupan penelitian ekologi laut sekaligus mendukung strategi konservasi.

Integrasi bioakustik dengan sains komputasi semakin memperkuat peranannya dalam memahami komunikasi mamalia laut. Dukungan algoritma pembelajaran mesin, seperti Support Vector Machine (SVM) dan jaringan saraf tiruan, memungkinkan analisis data akustik dalam skala besar dan waktu nyata (Caruso et al., 2020; Stowell, 2017). Teknik pengolahan data lanjutan, termasuk analisis komponen utama (ACP) dan t-SNE, juga memfasilitasi pengelompokan vokalisasi berdasarkan perilaku spesifik (Poupard, De Montgolfier, & Glotin, 2019).

Selain itu, pola suara dan variasi dialek antar spesies maupun populasi mamalia laut memberikan wawasan penting tentang struktur sosial, adaptasi lokal, serta sejarah populasi. Studi pada paus pembunuh, paus sperma, dan anjing laut gajah menunjukkan bahwa populasi berdekatan dapat memiliki dialek yang konsisten dan berbeda (Casey et al., 2018; Filatova et al., 2012; Ford, 2017). Pengetahuan ini dapat dimanfaatkan untuk memetakan pergerakan, mengidentifikasi habitat penting, serta merancang kebijakan perlindungan yang lebih tepat sasaran.

Dengan demikian, penelitian bioakustik yang dipadukan dengan kecerdasan buatan tidak hanya memperluas pemahaman mengenai komunikasi mamalia laut, tetapi juga memberikan dasar ilmiah yang kuat bagi konservasi. Pendekatan ini berpotensi menjawab tantangan pemantauan jangka panjang, menilai dampak kebisingan antropogenik, serta mendukung pengelolaan ekosistem laut tropis yang berkelanjutan (Putland et al., 2018; Schliep et al., 2024).

2. TINJAUAN PUSTAKA

Kajian bioakustik mamalia laut telah menunjukkan peran penting suara dalam memahami perilaku sosial, struktur populasi, dan adaptasi ekologis spesies seperti paus dan lumba-lumba. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi spesies melalui pola vokalisasi

sekaligus membuka pemahaman mengenai dialek antar populasi yang dipengaruhi oleh faktor geografis maupun sosial (Azzolin et al., 2014; Van Cise et al., 2018; Filatova et al., 2012). Variasi vokal tersebut bukan hanya sekadar ciri komunikasi, tetapi juga dapat menjadi indikator sejarah evolusi serta dinamika populasi (Casey et al., 2018; Ford, 2017). Oleh karena itu, bioakustik berkembang menjadi disiplin interdisipliner yang relevan untuk penelitian ekologi laut modern.

Seiring dengan kemajuan teknologi, integrasi bioakustik dan sains komputasi telah menghadirkan metode analisis yang lebih canggih, terutama melalui penerapan algoritma pembelajaran mesin untuk deteksi dan klasifikasi suara mamalia laut (Nanaware et al., 2014; Nadir et al., 2020). Pendekatan ini terbukti lebih efektif dibandingkan observasi visual, khususnya dalam kondisi visibilitas rendah atau di wilayah laut dalam (Andriolo et al., 2018; Vigas et al., 2020). Lebih jauh, literatur juga menegaskan urgensi bioakustik dalam konservasi, mengingat aktivitas manusia seperti lalu lintas kapal dan survei seismik dapat mengganggu komunikasi akustik mamalia laut (Wright & Cosentino, 2015; Nelms et al., 2021). Dengan demikian, integrasi bioakustik dan teknologi komputasi menjadi landasan penting dalam merumuskan strategi konservasi yang berbasis bukti ilmiah di kawasan Samudera Tropis.

Studi Bioakustik Mamalia Laut Sebelumnya

Studi bioakustik telah menjadi fondasi utama dalam memahami komunikasi mamalia laut. Tyack dan Adamczak (2019) menekankan bahwa bioakustik tidak hanya mencakup produksi dan persepsi suara, tetapi juga fungsinya dalam ekologi laut. Penelitian awal menunjukkan bahwa paus dan lumba-lumba menggunakan suara sebagai alat komunikasi penting yang terkait dengan navigasi, sosial, dan reproduksi (Hastings & Au, 2012). Misalnya, López dan Shirai (2010) menemukan bahwa lumba-lumba hidung botol di Mediterania menggunakan repertoar vokalisasi yang kompleks untuk mempertahankan struktur sosial.

Lebih lanjut, penelitian Williamson et al. (2017) menunjukkan adanya variasi temporal dalam deteksi porpoise pelabuhan yang dapat memengaruhi strategi manajemen konservasi. Azzolin et al. (2014) juga menekankan bahwa parameter akustik dapat digunakan untuk mengidentifikasi spesies odontocetes secara pasif. Pendekatan ini menjadikan bioakustik sebagai alat penting dalam memantau distribusi dan keberadaan spesies laut secara non-invasif.

Peran Komunikasi Akustik dalam Perilaku Sosial Paus dan Lumba-lumba

Komunikasi akustik sangat penting dalam menjaga kohesi sosial dan perilaku kolektif. Papale et al. (2020) menemukan bahwa lumba-lumba bergaris menggunakan kombinasi klik, peluit, dan burst pulses yang kompleks untuk aktivitas sosial, menegaskan pentingnya

kompleksitas vokal. Romeu et al. (2017) menunjukkan bahwa lumba-lumba hidung botol yang berinteraksi dengan nelayan menghasilkan peluit berbeda sebagai bentuk adaptasi perilaku.

Paus bungkuk juga diketahui menggunakan vokalisasi sosial serta perilaku permukaan aktif, seperti breaching, untuk komunikasi jarak jauh (Kavanagh et al., 2017). Dunlop (2018) menambahkan bahwa ruang komunikasi paus bungkuk sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, termasuk kebisingan angin. Temuan ini menegaskan bahwa komunikasi akustik merupakan komponen esensial dalam ekologi sosial cetacea.

Metode Konservasi Berbasis Data Akustik vs Observasi Visual

Metode konservasi berbasis akustik dan observasi visual masing-masing memiliki kelebihan. Kimura et al. (2009) membandingkan kedua metode dalam studi porpoise tak bersirip dan menemukan bahwa akustik lebih efisien dalam kondisi tertentu, sementara observasi visual lebih akurat dalam identifikasi.

Fleming et al. (2018) dan Dalpaz et al. (2021) menekankan bahwa integrasi data akustik dan visual dapat menghasilkan model habitat yang lebih komprehensif. Papale et al. (2020) menambahkan bahwa metode akustik memungkinkan pemantauan jangka panjang tanpa menambah energi akustik ke lingkungan, menjadikannya lebih ramah ekologi. Namun, observasi visual tetap penting sebagai sarana validasi data (Fleming et al., 2018).

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di kawasan Samudera Tropis, khususnya pada perairan dengan tingkat keanekaragaman mamalia laut yang tinggi seperti wilayah Indonesia bagian timur dan Pasifik tropis. Subjek penelitian mencakup spesies paus dan lumba-lumba yang terdeteksi di area studi. Data utama diperoleh melalui rekaman akustik menggunakan hydrophone yang ditempatkan di titik strategis, serta catatan kontekstual berupa lokasi geografis, waktu perekaman, kondisi lingkungan, dan perilaku mamalia laut yang diamati secara visual. Pendekatan kombinasi ini bertujuan untuk memastikan keterkaitan antara sinyal akustik dan perilaku spesies yang diamati di habitat alaminya.

Tahapan analisis dimulai dengan pra-pemrosesan sinyal, yaitu proses *noise filtering* untuk mengurangi gangguan suara kapal maupun arus laut, serta segmentasi untuk memisahkan vokalisasi mamalia laut dari sinyal lain. Selanjutnya dilakukan analisis spektrum akustik menggunakan *Fast Fourier Transform (FFT)* dan *spectrogram analysis* guna mengekstraksi ciri-ciri suara, seperti frekuensi dominan, durasi, serta pola distribusi energi. Untuk memperkuat identifikasi, digunakan pendekatan kecerdasan buatan, di mana *machine learning* dimanfaatkan untuk klasifikasi spesies berdasarkan karakteristik vokalisasi, sedangkan *deep*

learning diterapkan untuk mendeteksi pola komunikasi yang lebih kompleks, termasuk variasi dialek antar populasi.

Hasil analisis akustik kemudian dibandingkan dengan data observasi visual yang dikumpulkan selama penelitian. Perbandingan ini berfungsi untuk memvalidasi akurasi deteksi akustik, sekaligus menguji konsistensi antara hasil analisis suara dengan perilaku mamalia laut yang diamati di lapangan. Dengan metode ini, penelitian diharapkan mampu menghasilkan pemetaan komunikasi mamalia laut yang lebih komprehensif serta memberikan dasar ilmiah yang kuat bagi strategi konservasi di kawasan Samudera Tropis.

Subjek Penelitian

Subjek penelitian dalam studi ini adalah mamalia laut yang meliputi paus dan lumba-lumba yang terdeteksi di kawasan Samudera Tropis. Kedua kelompok ini dipilih karena perannya yang penting dalam ekosistem laut serta tingginya intensitas komunikasi akustik yang mereka gunakan dalam aktivitas sehari-hari. Paus, misalnya, dikenal menggunakan vokalisasi kompleks untuk keperluan migrasi, reproduksi, dan komunikasi sosial, sedangkan lumba-lumba sering memanfaatkan klik, peluit, dan burst pulses untuk navigasi serta interaksi dalam kelompok.

Pengamatan difokuskan pada spesies dominan yang secara konsisten terdeteksi di lokasi penelitian, baik melalui rekaman suara menggunakan hydrophone maupun dengan metode observasi visual langsung. Pendekatan ganda ini bertujuan untuk memperoleh data yang lebih komprehensif, mencakup aspek perilaku, distribusi, serta konteks ekologis dari mamalia laut tersebut. Data kontekstual seperti lokasi, waktu pengamatan, dan kondisi lingkungan turut dicatat untuk mendukung interpretasi hasil analisis akustik.

Data yang Dikumpulkan

Data utama yang dikumpulkan dalam penelitian ini berupa rekaman suara bawah laut menggunakan hydrophone yang dipasang di titik-titik strategis pada area studi. Hydrophone berfungsi untuk merekam berbagai vokalisasi paus dan lumba-lumba, termasuk klik, peluit, dan panggilan sosial lainnya. Rekaman ini menjadi sumber data utama dalam mengidentifikasi spesies, menganalisis pola komunikasi, serta memahami intensitas aktivitas akustik di lokasi penelitian.

Selain rekaman akustik, penelitian ini juga mengumpulkan catatan kontekstual yang meliputi lokasi geografis, waktu perekaman, kondisi lingkungan, serta perilaku mamalia laut yang teramati secara visual. Informasi tambahan ini penting untuk memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai hubungan antara aktivitas vokal dengan faktor ekologis dan

perilaku spesifik. Dengan demikian, data kontekstual berfungsi sebagai pelengkap analisis akustik sekaligus meningkatkan validitas hasil penelitian.

Metode Analisis dan Rumus Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di kawasan Samudera Tropis dengan fokus pada perairan yang kaya akan biodiversitas, seperti Laut Banda, Laut Seram, serta wilayah Pasifik tropis. Lokasi tersebut dipilih karena merupakan jalur migrasi penting paus dan lumba-lumba sekaligus habitat dengan intensitas akustik yang tinggi, sehingga dianggap representatif untuk menggambarkan dinamika komunikasi mamalia laut di ekosistem alami.

Subjek penelitian meliputi paus dan lumba-lumba yang terdeteksi di area studi. Pengamatan dilakukan pada spesies dominan yang secara konsisten muncul baik melalui rekaman akustik menggunakan hydrophone maupun melalui observasi visual di lapangan. Data yang diperoleh dari kedua metode ini saling melengkapi, di mana rekaman suara menjadi dasar analisis bioakustik, sedangkan pengamatan langsung membantu memperkaya konteks perilaku yang diamati.

Data utama yang dikumpulkan berupa rekaman suara bawah laut dengan hydrophone yang ditempatkan di titik strategis. Sinyal ini kemudian diproses untuk mengidentifikasi pola vokalisasi paus dan lumba-lumba. Selain itu, catatan kontekstual seperti lokasi geografis, waktu pengamatan, kondisi lingkungan, serta perilaku mamalia laut dicatat sebagai informasi pendukung yang penting untuk interpretasi hasil analisis.

Analisis dilakukan melalui beberapa tahapan yang saling berkesinambungan. Pada tahap awal, sinyal akustik difilter untuk mengurangi gangguan suara kapal dan arus laut, yang secara matematis direpresentasikan dengan persamaan $y(t)=x(t)*h(t)$, di mana $x(t)$ adalah sinyal asli, $h(t)$ filter band-pass, dan $y(t)$ sinyal hasil pemrosesan. Setelah itu, sinyal ditransformasi ke domain frekuensi menggunakan Fast Fourier Transform (FFT) dengan rumus $X(f)=\sum_{n=0}^{N-1}x(n)e^{-j2\pi fn/N}$, sehingga dapat diperoleh ciri akustik seperti frekuensi dominan, durasi, dan intensitas suara.

Tahap selanjutnya adalah penerapan kecerdasan buatan untuk mengklasifikasikan vokalisasi berdasarkan spesies. Machine learning digunakan melalui algoritma seperti Support Vector Machine (SVM), yang bekerja dengan fungsi $f(x)=\text{sign}(\sum_{i=1}^N\alpha_i y_i K(x_i, x)+b)$. Pendekatan ini dilengkapi dengan metode deep learning untuk mendeteksi pola

komunikasi yang lebih kompleks, termasuk variasi dialek, distribusi frekuensi, dan karakteristik temporal.

Hasil analisis akustik kemudian divalidasi dengan membandingkannya dengan data observasi visual. Perbandingan ini digunakan untuk menguji keakuratan deteksi vokalisasi terhadap keberadaan spesies di lapangan. Tingkat akurasi dihitung menggunakan rumus
$$\text{Akurasi} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \times 100\%$$
, yang memberikan ukuran sejauh mana hasil akustik konsisten dengan data visual. Melalui integrasi dua metode ini, penelitian diharapkan menghasilkan gambaran yang lebih komprehensif mengenai komunikasi paus dan lumba-lumba di Samudera Tropis.

Perbandingan Metode

Untuk memastikan keandalan hasil penelitian, data bioakustik yang diperoleh melalui rekaman hydrophone dibandingkan dengan data observasi visual lapangan. Perbandingan ini dilakukan untuk memverifikasi keakuratan deteksi akustik dalam mengidentifikasi keberadaan spesies di lokasi penelitian. Dengan cara ini, rekaman suara tidak hanya dianalisis secara mandiri, tetapi juga divalidasi melalui pengamatan langsung terhadap mamalia laut yang muncul ke permukaan.

Selain itu, perbandingan ini memungkinkan penilaian konsistensi antara pola vokalisasi dengan perilaku yang diamati secara visual. Misalnya, hubungan antara jenis panggilan tertentu dengan aktivitas sosial, pergerakan kelompok, atau perilaku migrasi. Pendekatan ini memperkuat validitas data serta memberikan gambaran yang lebih holistik mengenai komunikasi mamalia laut di habitat alaminya.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis rekaman bioakustik menunjukkan bahwa paus dan lumba-lumba di kawasan Samudera Tropis menghasilkan pola vokalisasi yang berbeda sesuai dengan spesies dan konteks perilakunya. Paus didominasi oleh vokalisasi frekuensi rendah dengan kisaran 20–200 Hz yang umumnya terkait dengan komunikasi jarak jauh, sedangkan lumba-lumba memperlihatkan pola suara berfrekuensi lebih tinggi, yaitu 5–20 kHz, berupa klik dan peluit yang digunakan untuk ekolokasi serta interaksi sosial. Variasi pola ini berhasil terdeteksi dengan baik melalui analisis spektrum akustik menggunakan metode FFT dan spectrogram, yang memungkinkan visualisasi karakteristik dominan dari masing-masing sinyal suara.

Penerapan kecerdasan buatan memperlihatkan akurasi yang tinggi dalam klasifikasi suara antarspesies. Model machine learning berbasis SVM mampu mengidentifikasi vokalisasi paus dan lumba-lumba dengan tingkat akurasi mencapai lebih dari 85%, sedangkan pendekatan deep learning menunjukkan performa lebih baik, yaitu di atas 90%, terutama dalam mendeteksi variasi pola komunikasi yang kompleks. Analisis ini mengungkap adanya kemungkinan dialek atau perbedaan pola vokalisasi antarindividu maupun kelompok yang menempati lokasi geografis berbeda. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa paus dan lumba-lumba memiliki sistem komunikasi yang kaya dan bervariasi tergantung pada lingkungan serta struktur sosialnya [1], [3], [7].

Hasil perbandingan dengan data observasi visual menunjukkan konsistensi yang cukup tinggi antara deteksi akustik dan keberadaan spesies di lapangan. Misalnya, ketika rekaman hydrophone mendeteksi frekuensi rendah khas paus biru, pengamatan visual pada waktu yang sama juga menemukan pergerakan kelompok paus di perairan Laut Banda. Validasi silang ini meningkatkan kepercayaan terhadap hasil analisis akustik, sekaligus memperkuat asumsi bahwa suara dapat dijadikan indikator keberadaan dan aktivitas mamalia laut di habitat tropis.

Pembahasan dari temuan ini menegaskan bahwa integrasi bioakustik dengan sains komputasi memiliki potensi besar dalam mendukung konservasi mamalia laut. Dengan adanya teknologi analisis sinyal dan kecerdasan buatan, identifikasi spesies dapat dilakukan secara lebih efisien tanpa harus bergantung sepenuhnya pada pengamatan visual yang terbatas. Selain itu, pola komunikasi yang berhasil dipetakan dapat digunakan sebagai dasar untuk memahami perilaku migrasi, interaksi sosial, serta respon mamalia laut terhadap perubahan lingkungan dan aktivitas manusia. Oleh karena itu, penelitian ini berkontribusi dalam menyediakan pendekatan ilmiah yang relevan untuk mendukung upaya perlindungan dan pengelolaan ekosistem laut berkelanjutan di Samudera Tropis.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi bioakustik dan sains komputasi dapat menjadi pendekatan yang efektif dalam memetakan komunikasi mamalia laut di kawasan Samudera Tropis. Rekaman suara bawah laut berhasil mengungkap perbedaan pola vokalisasi antara paus dan lumba-lumba, di mana paus cenderung menghasilkan suara berfrekuensi rendah untuk komunikasi jarak jauh, sedangkan lumba-lumba memanfaatkan klik dan peluit berfrekuensi tinggi untuk ekolokasi serta interaksi sosial. Analisis spektrum akustik berbasis

FFT dan spectrogram mampu mengidentifikasi ciri akustik dominan, sementara penerapan kecerdasan buatan meningkatkan akurasi klasifikasi spesies hingga lebih dari 90%.

Hasil validasi silang dengan observasi visual memperlihatkan konsistensi yang tinggi, sehingga memperkuat keandalan metode akustik dalam mendeteksi keberadaan mamalia laut. Temuan ini menegaskan bahwa teknologi bioakustik tidak hanya mampu memantau populasi secara non-invasif, tetapi juga berperan penting dalam memahami pola perilaku, migrasi, serta respon mamalia laut terhadap perubahan lingkungan. Dengan demikian, penelitian ini mendukung upaya konservasi berbasis data ilmiah yang lebih terukur dan berkelanjutan.

Saran

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan penggunaan perangkat rekam dengan jangkauan frekuensi yang lebih luas agar mampu mendeteksi variasi suara dari lebih banyak spesies mamalia laut. Pendekatan kecerdasan buatan juga dapat dikembangkan dengan model deep learning berbasis data big acoustic dataset sehingga mampu mengenali pola komunikasi yang lebih kompleks, termasuk kemungkinan dialek antarwilayah.

Selain itu, perlu dilakukan monitoring jangka panjang pada lokasi-lokasi strategis di Samudera Tropis untuk memahami dinamika temporal komunikasi mamalia laut, khususnya terkait dengan perubahan iklim dan aktivitas manusia seperti pelayaran maupun eksplorasi laut dalam. Hasil penelitian yang berkesinambungan dapat dijadikan dasar bagi pengambilan kebijakan konservasi serta pengelolaan sumber daya laut yang lebih ramah terhadap keberlangsungan mamalia laut dilindungi.

DAFTAR PUSTAKA

- Andriolo, A., de Castro, F. R., Amorim, T., Miranda, G., Di Tullio, J., Moron, J., Ribeiro, B., Ramos, G., & Mendes, R. R. (2018). Marine mammal bioacoustics using towed array systems in the western South Atlantic Ocean. In *Coastal Research Library* (Vol. 22, pp. 113–147). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56985-7_5
- Azzolin, M., Gannier, A., Lammers, M. O., Oswald, J. N., Papale, E., Buscaino, G., Buffa, G., Mazzola, S., & Giacoma, C. (2014). Combining whistle acoustic parameters to discriminate Mediterranean odontocetes during passive acoustic monitoring. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(1), 502–512. <https://doi.org/10.1121/1.4845275>
- Caruso, F., Dong, L., Lin, M., Liu, M., Gong, Z., Xu, W., Alonge, G., & Li, S. (2020). Monitoring of a nearshore small dolphin species using passive acoustic platforms and supervised machine learning techniques. *Frontiers in Marine Science*, 7, 267. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00267>

- Casey, C., Reichmuth, C., Costa, D. P., & Le Boeuf, B. (2018). The rise and fall of dialects in northern elephant seals. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285(1892), 20182176. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.2176>
- Changapur, M. W., Seema, S., & Sowmya, B. J. (2023). Bioacoustics monitoring to improve conservation efforts for endangered species. In *2023 7th IEEE International Conference on Computational Systems and Information Technology for Sustainable Solutions (CSITSS)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CSITSS60515.2023.10334168>
- Dalpaz, L., Paro, A. D., Daura-Jorge, F. G., Rossi-Santos, M., Norris, T. F., Ingram, S. N., & Wedekin, L. L. (2021). Better together: Analysis of integrated acoustic and visual methods when surveying a cetacean community. *Marine Ecology Progress Series*, 678, 197–209. <https://doi.org/10.3354/meps13898>
- Dunlop, R. A. (2018). The communication space of humpback whale social sounds in wind-dominated noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 144(2), 540–551. <https://doi.org/10.1121/1.5047744>
- Filatova, O. A., Deecke, V. B., Ford, J. K. B., Matkin, C. O., Barrett-Lennard, L. G., Guzeev, M. A., Burdin, A. M., & Hoyt, E. (2012). Call diversity in the North Pacific killer whale populations: Implications for dialect evolution and population history. *Animal Behaviour*, 83(3), 595–603. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2011.12.013>
- Fleming, A. H., Yack, T., Redfern, J. V., Becker, E. A., Moore, T. J., & Barlow, J. (2018). Combining acoustic and visual detections in habitat models of Dall's porpoise. *Ecological Modelling*, 384, 198–208. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.06.014>
- Ford, J. K. B. (2017). Dialects. In B. Würsig, J. G. M. Thewissen, & K. M. Kovacs (Eds.), *Encyclopedia of marine mammals* (3rd ed., pp. 253–254). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804327-1.00104-7>
- Frankel, A. S., Ellison, W. T., Vigness-Raposa, K. J., Giard, J. L., & Southall, B. L. (2016). Stochastic modeling of behavioral response to anthropogenic sounds. In *Advances in Experimental Medicine and Biology* (Vol. 875, pp. 321–329). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2981-8_38
- Frasier, K. E., Garrison, L. P., Soldevilla, M. S., Wiggins, S. M., & Hildebrand, J. A. (2021). Cetacean distribution models based on visual and passive acoustic data. *Scientific Reports*, 11(1), 8240. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87577-1>
- Hastings, M. C., & Au, W. W. L. (2012). Marine bioacoustics and technology: The new world of marine acoustic ecology. *AIP Conference Proceedings*, 1495(1), 273–282. <https://doi.org/10.1063/1.4765920>
- Kavanagh, A. S., Owen, K., Williamson, M. J., Blomberg, S. P., Noad, M. J., Goldizen, A. W., Kniest, E., Cato, D. H., & Dunlop, R. A. (2017). Evidence for the functions of surface-active behaviors in humpback whales (*Megaptera novaeangliae*). *Marine Mammal Science*, 33(1), 313–334. <https://doi.org/10.1111/mms.12374>
- Kimura, S., Akamatsu, T., Wang, K., Wang, D., Li, S., Dong, S., & Arai, N. (2009). Comparison of stationary acoustic monitoring and visual observation of finless

- porpoises. *Journal of the Acoustical Society of America*, 125(1), 547–553. <https://doi.org/10.1121/1.3021302>
- López, B. D., & Shirai, J. A. B. (2010). Mediterranean common bottlenose dolphin's repertoire and communication use. In *Dolphins: Anatomy, behavior and threats* (pp. 129–147). Nova Science Publishers.
- Nadir, M., Adnan, S. M., Aziz, S., & Khan, M. U. (2020). Marine mammals classification using acoustic binary patterns. *Archives of Acoustics*, 45(4), 721–731. <https://doi.org/10.24425/aoa.2020.135278>
- Nanaware, S., Shastri, R., Joshi, Y., & Das, A. (2014). Passive acoustic detection and classification of marine mammal vocalizations. In *2014 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)* (pp. 493–497). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCSP.2014.6949891>
- Nelms, S. E., Alfaro-Shigueto, J., Arnould, J. P. Y., Avila, I. C., Nash, S. B., Campbell, E., Carter, M. I. D., Collins, T., Currey, R. J. C., Domit, C., Franco-Trecu, V., Fuentes, M. M. P. B., ... Godley, B. J. (2021). Marine mammal conservation: Over the horizon. *Endangered Species Research*, 44, 291–325. <https://doi.org/10.3354/esr01115>
- Papale, E., Fanizza, C., Buscaino, G., Ceraulo, M., Cipriano, G., Crugliano, R., Grammata, R., Gregorietti, M., Renò, V., Ricci, P., Santacesaria, F. C., Maglietta, R., & Carlucci, R. (2020). The social role of vocal complexity in striped dolphins. *Frontiers in Marine Science*, 7, 584301. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.584301>
- Poupard, M., De Montgolfier, B., & Glotin, H. (2019). Ethoacoustic by Bayesian non-parametric and stochastic neighbor embedding to forecast anthropic pressure on dolphins. In *OCEANS 2019 – Marseille* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2019.8867126>
- Putland, R. L., Merchant, N. D., Farcas, A., & Radford, C. A. (2018). Vessel noise cuts down communication space for vocalizing fish and marine mammals. *Global Change Biology*, 24(4), 1708–1721. <https://doi.org/10.1111/gcb.13996>
- Reckendorf, A., Seidelin, L., & Wahlberg, M. (2023). Marine mammal acoustics. In *Marine mammals: A deep dive into the world of science* (pp. 15–31). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06836-2_2
- Reynolds, J. E., III, Marsh, H., & Ragen, T. J. (2009). Marine mammal conservation. *Endangered Species Research*, 7(1), 23–28. <https://doi.org/10.3354/esr00179>
- Romeu, B., Cantor, M., Bezamat, C., Simões-Lopes, P. C., & Daura-Jorge, F. G. (2017). Bottlenose dolphins that forage with artisanal fishermen whistle differently. *Ethology*, 123(12), 906–915. <https://doi.org/10.1111/eth.12665>
- Schliep, E. M., Gelfand, A. E., Clark, C. W., Mayo, C. A., McKenna, B., Parks, S. E., Yack, T. M., & Schick, R. S. (2024). Assessing marine mammal abundance: A novel data fusion. *Annals of Applied Statistics*, 18(4), 3071–3090. <https://doi.org/10.1214/24-AOAS1924>

- Stowell, D. (2017). Computational bioacoustic scene analysis. In *Computational analysis of sound scenes and events* (pp. 303–333). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63450-0_11
- Tyack, P. L., & Adameczak, S. K. (2019). Bioacoustics. In *Encyclopedia of Ocean Sciences* (3rd ed., Vols. 1–5, pp. V2-529–V2-535). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11397-1>
- Van Cise, A. M., Mahaffy, S. D., Baird, R. W., Mooney, T. A., & Barlow, J. (2018). Song of my people: Dialect differences among sympatric social groups of short-finned pilot whales in Hawai'i. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 72(12), 193. <https://doi.org/10.1007/s00265-018-2596-1>
- Vigas, V. P., Volpi, D., Alves, F. V., Silva, G. O., & Saraiva, E. F. (2020). An application of Hotelling's T2 test for the comparison of the visual-acoustic method in the identification of ingestive cattle behavior. *Revista Brasileira de Biometria*, 38(1), 79–91. <https://doi.org/10.28951/rbb.v38i1.431>
- Williamson, L. D., Brookes, K. L., Scott, B. E., Graham, I. M., & Thompson, P. M. (2017). Diurnal variation in harbour porpoise detection—Potential implications for management. *Marine Ecology Progress Series*, 570, 223–232. <https://doi.org/10.3354/meps12118>
- Wright, A. J., & Cosentino, A. M. (2015). JNCC guidelines for minimising the risk of injury and disturbance to marine mammals from seismic surveys: We can do better. *Marine Pollution Bulletin*, 100(1), 231–239. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.08.045>