

FUTURE HABITAT SUITABILITY OF LITTLE TUNA (*Euthynnus affinis*) IN THE BANDA SEA UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS

Kesesuaian Habitat Masa Depan Ikan Tongkol Komo (*Euthynnus affinis*) di Laut Banda di bawah Skenario Perubahan Iklim

Oleh:

David Reivaldo Manuel¹, Mochamad Candra Wirawan Arief^{2*}, Sri Een Hartatik³, Subiyanto⁴, Qurnia Wulan Sari⁴, Sunarto⁴

¹Marine Conservation Study Program, Faculty of Fisheries and Marine Sciences, Universitas Padjadjaran, Sumedang 45363, Indonesia

²Department of Fisheries, Faculty of Fisheries and Marine Sciences, Universitas Padjadjaran, Sumedang 45363, Indonesia

³Research Center for Ecology, National Research and Innovation Agency (BRIN), Cibinong 16911, Indonesia

⁴Department of Marine Sciences, Faculty of Fisheries and Marine Sciences, Universitas Padjadjaran, Sumedang 45363, Indonesia

*Korespondensi penulis: mochamad.candra@unpad.ac.id

ABSTRACT

*Banda Sea is one of most important fishing grounds for *Euthynnus affinis* in Indonesia; however, information on its potential habitat distribution and response to climate change remains limited. This study aimed to analyze current potential habitat distribution of *E. affinis* based on oceanographic conditions and to project future habitat suitability under climate change scenarios for the 2030–2040 period. Habitat suitability was modeled using ‘Maximum Entropy’ (MaxEnt) approach with fish occurrence data collected from 2017 to 2022 and environmental variables including sea surface temperature, chlorophyll-a, sea surface salinity, current velocity, and bathymetry. The model demonstrated good predictive performance, with an Area Under the Curve (AUC) value of 0.794. Sea surface salinity and sea surface temperature were identified as the primary environmental factors influencing the distribution of *E. affinis*. Optimal habitat conditions were associated with salinity of 33–34 PSU, sea surface temperatures of 30–31 °C, and current velocities of 0.05–0.20 m s⁻¹. Under present environmental conditions, suitable habitats were primarily concentrated in the western, northwestern, and southwestern parts of the Banda Sea. Future projections indicated that the Banda Sea is likely to remain a suitable habitat for *E. affinis* under all climate change scenarios, although shifts in habitat quality and spatial distribution are expected. Among the projected scenarios, SSP2-4.5 maintained relatively favorable habitat conditions, whereas SSP4-6.0 showed the greatest decline in habitat suitability. These findings provide valuable scientific information to support climate-adaptive fisheries management through the identification of potential future habitats for *E. affinis*.*

Key words: *Banda Sea, climate change, *Euthynnus affinis*, habitat suitability, ‘Maximum Entropy’*

ABSTRAK

Laut Banda merupakan salah satu wilayah perairan penting bagi perikanan tongkol (*Euthynnus affinis*), namun informasi mengenai distribusi habitat potensial dan responsnya terhadap perubahan

iklim masih terbatas. Penelitian ini bertujuan menganalisis distribusi habitat potensial *E. affinis* berdasarkan kondisi oseanografi saat ini serta memproyeksikan perubahan kesesuaian habitat pada periode 2030–2040. Pemodelan dilakukan menggunakan *Maximum Entropy* (*MaxEnt*) dengan data kemunculan hasil penangkapan tahun 2017–2022 dan variabel lingkungan yang meliputi suhu permukaan laut, klorofil-a, salinitas, kecepatan arus, dan batimetri. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model memiliki performa yang baik dengan nilai Area Under Curve (AUC) sebesar 0,794. Salinitas dan suhu permukaan laut merupakan faktor utama yang memengaruhi distribusi habitat *E. affinis*, dengan kondisi optimum pada salinitas 33–34 PSU, suhu permukaan laut 30–31°C, dan kecepatan arus 0,05–0,20 m s⁻¹. Pada kondisi saat ini, habitat potensial terutama terkonsentrasi di bagian barat, barat laut, dan barat daya Laut Banda. Hasil proyeksi menunjukkan bahwa Laut Banda tetap berpotensi menjadi habitat *E. affinis* pada seluruh skenario perubahan iklim, meskipun terjadi perubahan kualitas dan pola distribusi habitat. Skenario SSP2-4.5 mempertahankan kondisi habitat yang relatif lebih baik, sedangkan SSP4-6.0 menunjukkan penurunan kesesuaian habitat yang paling besar. Temuan ini menyediakan informasi ilmiah yang dapat mendukung pengelolaan perikanan *E. affinis* yang adaptif terhadap perubahan iklim melalui identifikasi wilayah habitat potensial pada masa mendatang.

Kata kunci: *Euthynnus affinis*, habitat potensial, laut Banda, ‘*Maximum Entropy*’, perubahan iklim

PENDAHULUAN

Laut Banda merupakan salah satu wilayah perairan penting di Indonesia yang memiliki produktivitas perikanan pelagis tinggi. Dinamika oseanografi di kawasan ini dipengaruhi oleh Arus Lintas Indonesia (*Indonesian Throughflow*), proses *upwelling* musiman, serta interaksi massa air dari Samudera Pasifik dan Samudera Hindia yang berperan dalam mengatur distribusi nutrisi, suhu permukaan laut, dan produktivitas perairan (Ismail *et al.*, 2020; Lubis *et al.*, 2025). Kondisi tersebut menjadikan Laut Banda sebagai habitat penting bagi berbagai spesies ikan pelagis bernilai ekonomi tinggi, termasuk tongkol.

Tongkol (*Euthynnus affinis*) merupakan salah satu komoditas perikanan pelagis penting di Indonesia yang memiliki nilai ekonomi tinggi dan menjadi target utama perikanan tangkap di berbagai wilayah perairan tropis (Maghfiroh & Zainuri, 2023). Sebagai ikan pelagis neritik yang memiliki mobilitas tinggi, distribusi tongkol dipengaruhi oleh kondisi lingkungan yang mendukung aktivitas makan, pertumbuhan, dan migrasi (Syamsuddin *et al.*, 2018; Vayghan *et al.*, 2020). Keberadaan spesies ini umumnya berkaitan dengan karakteristik oseanografi tertentu yang menentukan kesesuaian habitat dan ketersediaan sumber pakan.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa distribusi ikan pelagis dipengaruhi oleh parameter oseanografi seperti suhu permukaan laut, salinitas, klorofil-a, kecepatan arus, dan batimetri (Erauskin-Extramiana *et al.*, 2023; Pratama *et al.*, 2023). Variabel-variabel tersebut berperan dalam mengendalikan proses fisiologis ikan serta memengaruhi distribusi organisme mangsa. Oleh karena itu, variasi spasial dan temporal kondisi oseanografi dapat menyebabkan perubahan distribusi habitat potensial ikan pelagis, termasuk *E. affinis*. Selain dipengaruhi oleh variabilitas lingkungan alami, habitat ikan pelagis juga berpotensi mengalami perubahan akibat perubahan iklim. Peningkatan suhu permukaan laut, perubahan pola sirkulasi laut, dan perubahan produktivitas primer dapat memengaruhi kualitas habitat serta distribusi geografis berbagai spesies pelagis (Erauskin-Extramiana *et al.*, 2023). Beberapa studi menunjukkan bahwa perubahan kondisi oseanografi dapat menyebabkan pergeseran habitat menuju wilayah yang memiliki kondisi lingkungan lebih sesuai sehingga berpotensi memengaruhi keberlanjutan sumber daya perikanan pada masa mendatang (Cheung *et al.*, 2009; Syamsuddin *et al.*, 2025).

Salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk menganalisis distribusi habitat spesies adalah *Species Distribution Model* (SDM). Model '*Maximum Entropy*' (MaxEnt) merupakan salah satu metode SDM yang banyak diterapkan karena mampu menghasilkan prediksi distribusi spesies yang baik menggunakan data kehadiran (*presence-only data*) (Phillips *et al.*, 2006). Model ini telah banyak digunakan untuk memodelkan habitat berbagai spesies ikan pelagis dan mengevaluasi dampak perubahan lingkungan terhadap distribusinya (Elith & Leathwick, 2009; Phillips *et al.*, 2017).

Meskipun penelitian mengenai hubungan antara ikan pelagis dan kondisi oseanografi telah banyak dilakukan di Indonesia, kajian mengenai distribusi habitat potensial dan proyeksi perubahan habitat *E. affinis* di Laut Banda masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi faktor lingkungan yang memengaruhi distribusi habitat *E. affinis*, memodelkan habitat potensial pada kondisi saat ini menggunakan '*MaxEnt*', serta memproyeksikan perubahan distribusi habitat pada periode 2030–2040 berdasarkan berbagai skenario perubahan iklim. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah dalam mendukung pengelolaan perikanan tongkol yang adaptif terhadap perubahan lingkungan dan perubahan iklim di Laut Banda.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Laut Banda yang termasuk dalam Wilayah Pengelolaan Perikanan Negara Republik Indonesia (WPP-NRI) 714, dengan batas geografis antara 1°03'02"–8°27'51" LS dan 121°28'18"–133°07'19" BT (KKP, 2014). Lokasi penelitian disajikan pada **Figure 1**. Seluruh analisis spasial dilakukan menggunakan sistem koordinat geografis WGS 84 dan dibatasi sesuai wilayah WPP-NRI 714.

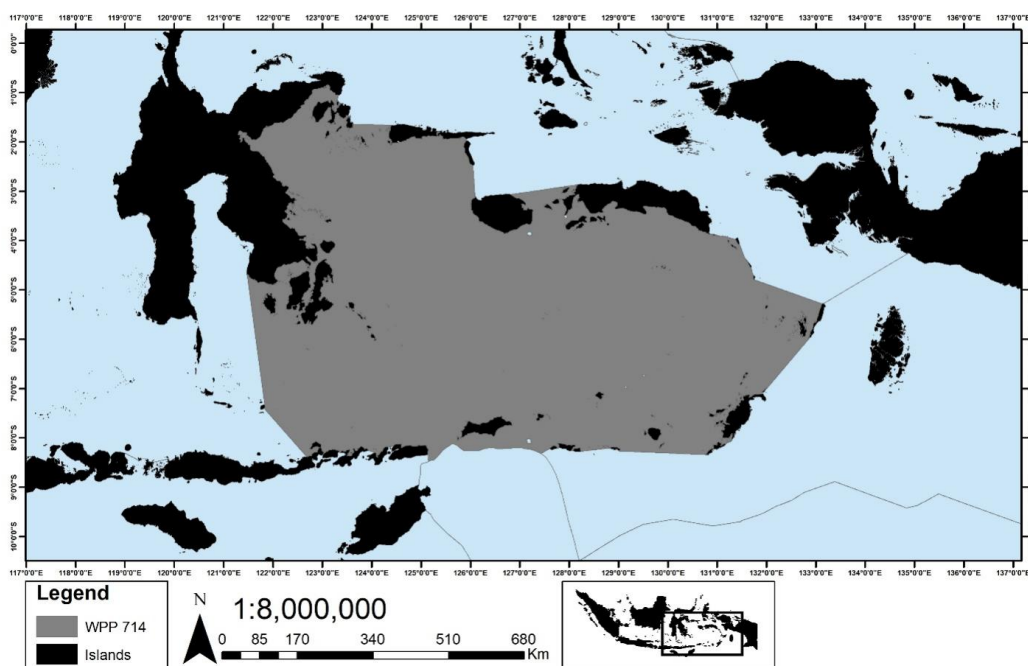


Figure 1 Research Location Map

Gray : Banda sea

Gambar 1 Peta lokasi penelitian

Abu-abu : Laut Banda

Data kemunculan (*occurrence data*) *Euthynnus affinis* diperoleh dari data *logbook* penangkapan ikan tahun 2017–2022. Data tersebut berupa titik koordinat lokasi penangkapan yang mencatat keberadaan tongkol di Laut Banda. Sebelum digunakan dalam pemodelan, data kemunculan terlebih

dahulu melalui proses pembersihan data dengan menghapus data duplikat, data tanpa informasi koordinat yang lengkap, serta data yang berada di luar wilayah penelitian. Untuk mengurangi pengaruh autokorelasi spasial dan bias pengambilan sampel, dilakukan proses *spatial thinning* menggunakan paket *spThin* pada perangkat lunak R dengan jarak minimum antar titik sebesar 10 km (Aiello-Lammens *et al.*, 2015; Phillips *et al.*, 2009). Data hasil *thinning* selanjutnya digunakan sebagai data kehadiran (*presence-only*) dalam pemodelan habitat.

Variabel lingkungan yang digunakan terdiri atas suhu permukaan laut (SPL), klorofil-a, salinitas permukaan laut, kecepatan arus, dan batimetri. Informasi mengenai sumber data, resolusi spasial, dan satuan masing-masing variabel disajikan pada **Table 1**.

Table 1. *Environmental variables used in the model*

Tabel 1. Variabel lingkungan yang digunakan dalam pemodelan

<i>Parameters</i>	<i>Sensor</i>	<i>Resolution</i>		<i>Sources</i>
		<i>Temporal</i>	<i>Spatial</i>	
SPL	AquaModis	Bulanan	4 km	oceancolor.gsfc.nasa.gov
Klorofil-a	AquaModis	Bulanan	4 km	oceancolor.gsfc.nasa.gov
Salinitas	CMES	Bulanan	9 km	Global Ocean Physics Reanalysis Copernicus Marine Service
Kecepatan arus	CMES	Bulanan	9 km	Global Ocean Physics Reanalysis Copernicus Marine Service
Batimetri	GEBCO	-	450 m	GEBCO General Bathymetric Chart of the Oceans

Pemodelan kesesuaian habitat dilakukan menggunakan perangkat lunak ‘*MaxEnt*’ versi 3.4.4 yang banyak digunakan dalam pemodelan distribusi spesies berbasis data kehadiran (*presence-only*). Model dikembangkan menggunakan pengaturan standar ‘*MaxEnt*’ dengan jumlah *background points* sebanyak 10.000 titik, batas maksimum iterasi sebesar 1.000, serta pembagian data sebesar 75% sebagai data latih (*training data*) dan 25% sebagai data uji (*testing data*) (Pratama *et al.*, 2023; Sharifian *et al.*, 2023). Evaluasi performa model dilakukan menggunakan nilai *Area Under the Curve* (AUC) dari *Receiver Operating Characteristic* (ROC). Kontribusi masing-masing variabel lingkungan dianalisis menggunakan nilai *percent contribution*, *permutation importance*, dan *jackknife test*, sedangkan *response curve* digunakan untuk mengidentifikasi kisaran kondisi lingkungan optimum bagi habitat *E. affinis*.

Proyeksi habitat masa depan dilakukan menggunakan data lingkungan Bio-ORACLE periode 2030–2040 pada enam skenario perubahan iklim *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP), yaitu SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP4-6.0, dan SSP5-8.5 (Assis *et al.*, 2024). Variabel yang digunakan dalam proyeksi meliputi suhu permukaan laut, salinitas, klorofil-a, dan kecepatan arus. Seluruh data proyeksi diseragamkan dengan data dasar agar memiliki resolusi, sistem koordinat, dan cakupan spasial yang sama sebelum digunakan dalam pemodelan.

Hasil output ‘*MaxEnt*’ berupa nilai *Habitat Suitability Index* (HSI) dengan rentang 0–1. Nilai tersebut kemudian diklasifikasikan menggunakan pendekatan *Minimum Presence Threshold* (MPT) menjadi empat kelas kesesuaian habitat, nilai di bawah MPT sebagai tidak sesuai (*Not Suitable/NS*), nilai antara MPT hingga 0,5 sebagai kesesuaian rendah (*Low Suitability/LS*), nilai antara 0,5 hingga 0,75 sebagai kesesuaian sedang (*Medium Suitability/MS*), dan nilai antara 0,75 hingga 1 sebagai kesesuaian tinggi (*High Suitability/HS*) (Phillips *et al.*, 2006; Phillips & Dudík, 2008). Luas masing-masing kelas habitat dihitung untuk mengevaluasi perubahan distribusi habitat potensial *E. affinis* pada berbagai skenario perubahan iklim.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Performa Model dan Kontribusi Variabel Lingkungan

Model ‘*MaxEnt*’ yang dibangun untuk *Euthynnus affinis* menunjukkan performa yang baik dengan nilai *Area Under the Curve* (AUC) sebesar 0,794 (**Figure 2**). Nilai tersebut menunjukkan bahwa variabel lingkungan yang digunakan mampu menjelaskan distribusi habitat potensial tongkol di Laut Banda dengan tingkat akurasi yang cukup tinggi. Performa model yang relatif baik mengindikasikan bahwa distribusi *E. affinis* memiliki hubungan yang kuat dengan kondisi oseanografi tertentu, terutama parameter yang berkaitan dengan karakteristik massa air dan kondisi termal permukaan.

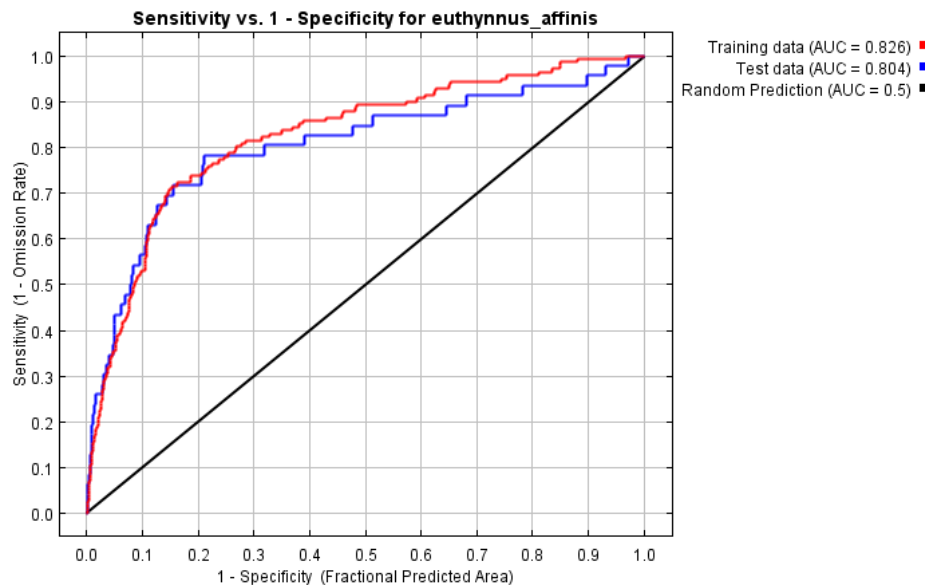


Figure 2 Model evaluation with Receiver Operating Characteristic (ROC) curve

Gambar 2 Evaluasi model dengan kurva *Receiver Operating Characteristic* (ROC)

Hasil analisis kontribusi variabel menunjukkan bahwa salinitas merupakan faktor lingkungan paling dominan dalam menentukan distribusi habitat potensial *E. affinis*, dengan nilai kontribusi sebesar 39,2% dan *permutation importance* sebesar 39,1% (**Table 2**). Variabel kedua yang paling berpengaruh adalah suhu permukaan laut (SPL) dengan kontribusi sebesar 34,6% dan *permutation importance* sebesar 23,7%. Sementara itu, batimetri dan kecepatan arus memberikan kontribusi sedang terhadap model, sedangkan klorofil-a memiliki kontribusi paling rendah, yaitu hanya 1,8%.

Table 2. Variable contributions

Tabel 2. Kontribusi variabel

Variabel	Kontribusi (%)	<i>Permutation Importance</i> (%)
Salinitas	39.2	39.1
SPL	34.6	23.7
Batimetri	15.8	18.7
Kecepatan arus	8.7	17.4
Klorofil-a	1.8	1.1

Hasil uji *jackknife* menunjukkan bahwa salinitas dan SPL menghasilkan nilai *training gain* tertinggi ketika digunakan secara tunggal (**Figure 3**). Temuan ini mengindikasikan bahwa kedua variabel tersebut merupakan pengontrol utama habitat potensial tongkol di Laut Banda. Dominasi

salinitas dan SPL menunjukkan bahwa distribusi *E. affinis* lebih dipengaruhi oleh karakteristik fisik massa air dibandingkan faktor produktivitas primer.

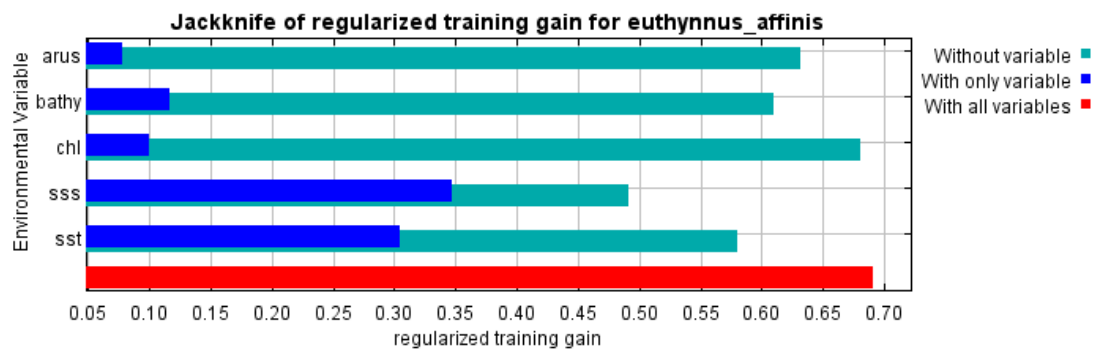


Figure 3 Jackknife test result

Gambar 3 Hasil uji Jackknife

Kurva respons memperlihatkan bahwa probabilitas keberadaan *E. affinis* meningkat pada kisaran salinitas sekitar 33–34 PSU dan suhu permukaan laut sekitar 30–31°C (**Figure 4**). Kisaran tersebut mencerminkan karakteristik massa air tropis hangat yang umum dijumpai di Laut Banda. Sebagai spesies pelagis neritik, tongkol diketahui lebih banyak ditemukan pada perairan tropis dengan kondisi salinitas yang relatif stabil. Gunarso (1985) menjelaskan bahwa tongkol memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap perubahan salinitas, sedangkan variasi salinitas di kawasan timur Indonesia dipengaruhi oleh proses pencampuran massa air, curah hujan, evaporasi, dan dinamika *Indonesian Throughflow* (ITF) (Satrioajie *et al.*, 2018; Wyrski *et al.*, 1961).

Selain salinitas dan SPL, kecepatan arus juga memengaruhi kesesuaian habitat *E. affinis*. Hasil *response curve* menunjukkan bahwa habitat optimum ditemukan pada kecepatan arus rendah hingga sedang, yaitu sekitar 0,05–0,20 m s⁻¹. Kondisi tersebut diduga mendukung proses *transport nutrien* dan akumulasi organisme mangsa sehingga menciptakan habitat yang lebih sesuai bagi tongkol. Arus juga berperan dalam pembentukan *front* oseanografi yang sering menjadi lokasi agregasi ikan pelagis dan sumber makanannya (Bakun, 2006; Snyder *et al.*, 2017).

Sebaliknya, klorofil-a menunjukkan kontribusi yang relatif rendah terhadap model. Rendahnya kontribusi tersebut mengindikasikan bahwa produktivitas primer kemungkinan memengaruhi distribusi tongkol secara tidak langsung melalui rantai makanan dan dinamika organisme mangsa, dibandingkan sebagai faktor pembatas utama habitat (Latifah *et al.*, 2024; Uneputti *et al.*, 2022).

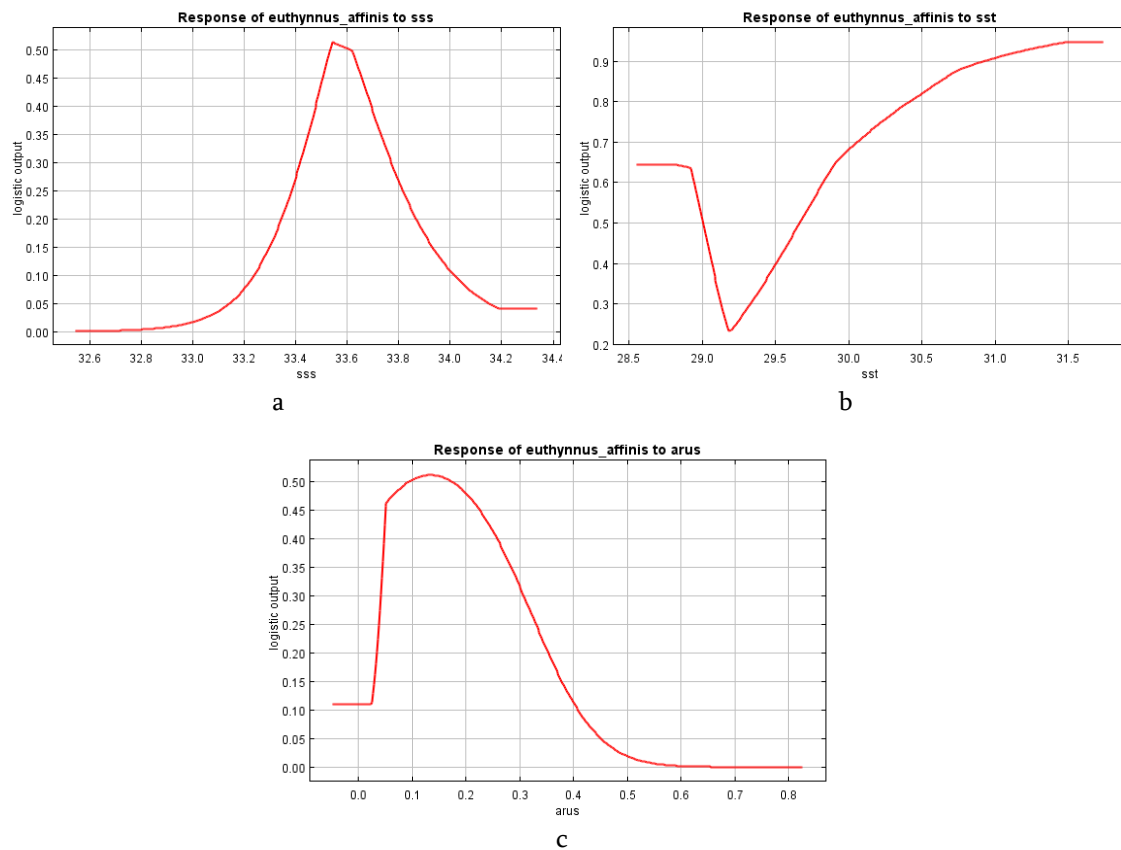


Figure 4 Response curves of key oceanographic variables to the potential habitat of *E. affinis* based on the 'MaxEnt' model

- (a) Salinity;
- (b) SST;
- (c) Current velocity

Gambar 4 Response curve variabel oseanografi utama terhadap habitat potensial *E.affinis* berdasarkan model 'MaxEnt'

- (a) Salinitas;
- (b) SPL;
- (c) Kecepatan arus

Distribusi Habitat Potensial *Euthynnus affinis* pada Kondisi Saat Ini

Peta *Habitat Suitability Index* (HSI) menunjukkan bahwa habitat potensial *Euthynnus affinis* di Laut Banda memiliki pola distribusi yang relatif terkonsentrasi dengan nilai HSI berkisar antara 0–0,92 (**Figure 5**). Secara umum, habitat dengan tingkat kesesuaian sedang hingga tinggi lebih banyak ditemukan pada bagian barat, barat daya, dan utara Laut Banda, sedangkan wilayah tengah hingga timur didominasi oleh habitat dengan tingkat kesesuaian rendah. Pola tersebut menunjukkan bahwa habitat tongkol di Laut Banda tidak tersebar secara merata, tetapi terkonsentrasi pada wilayah tertentu yang memiliki kondisi oseanografi lebih sesuai.

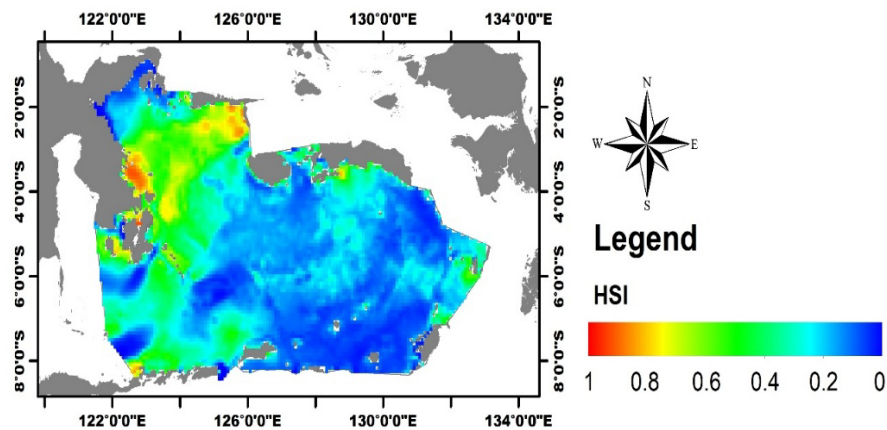


Figure 5 *Habitat Suitability Index (HSI) Map of E. affinis in the Banda Sea from 2017 to 2022*

Gambar 5 Peta *Habitat Suitability Index* (HSI) *E. affinis* di Laut Banda tahun 2017-2022

Hasil klasifikasi habitat berdasarkan pendekatan *Minimum Presence Threshold* (MPT) (**Figure 6**) menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah penelitian didominasi oleh kelas *Low Suitability* (LS) dengan luas mencapai 549.542,87 km² atau sekitar 83,97% dari total area penelitian. Habitat kelas *Medium Suitability* (MS) mencakup 71.935,70 km² (10,98%), sedangkan habitat kelas *High Suitability* (HS) hanya mencapai 12.104,64 km² (1,85%). Sementara itu, habitat yang tergolong *Not Suitable* (NS) memiliki luas sekitar 21.010,20 km² atau 3,21% dari total wilayah kajian.

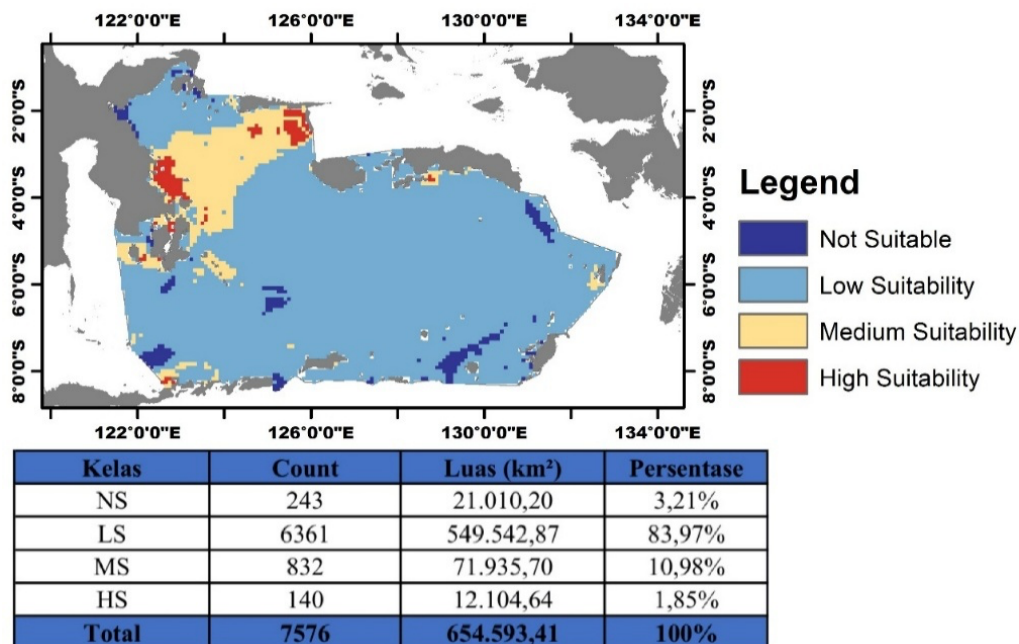


Figure 6 *Potential Habitat Classification Map of E. affinis based on the MPT in Banda Sea (2017–2022)*

Gambar 6 Peta klasifikasi habitat potensial *E. affinis* berdasarkan *Minimum Presence Threshold* (MPT) di Laut Banda tahun 2017–2022

Secara spasial, habitat kelas HS terutama terdistribusi pada bagian utara hingga barat laut Laut Banda dan muncul secara terbatas pada bagian barat daya wilayah penelitian. Sebaliknya, habitat kelas

LS mendominasi wilayah tengah hingga timur Laut Banda, sedangkan habitat kelas NS umumnya ditemukan pada bagian selatan dan tenggara perairan. Pola tersebut menunjukkan bahwa kondisi lingkungan optimum bagi *E. affinis* relatif terbatas dan hanya ditemukan pada area tertentu yang memiliki karakteristik oseanografi sesuai.

Distribusi habitat potensial yang terkonsentrasi pada bagian barat dan utara Laut Banda diduga berkaitan dengan pengaruh massa air tropis hangat yang memiliki kisaran salinitas dan suhu sesuai dengan preferensi habitat *E. affinis*. Hasil analisis sebelumnya menunjukkan bahwa habitat tongkol optimum berada pada kisaran salinitas sekitar 33–34 PSU dan suhu permukaan laut sekitar 30–31°C. Wilayah barat dan utara Laut Banda diketahui memiliki karakteristik massa air yang relatif stabil akibat pengaruh sirkulasi regional dan *Indonesian Throughflow* (ITF), sehingga menyediakan kondisi lingkungan yang lebih mendukung bagi keberadaan tongkol (Satrioajie *et al.*, 2018; Wyrтки *et al.*, 1961).

Sebagai spesies pelagis neritik, *E. affinis* umumnya berasosiasi dengan perairan tropis yang produktif dan memiliki keterkaitan kuat dengan wilayah transisi pesisir–oseanik. Menurut Furkan *et al.*, (2024), dan Wagiyo *et al.*, (2018) tongkol lebih sering ditemukan pada perairan yang dipengaruhi dinamika oseanografi permukaan serta memiliki ketersediaan makanan yang relatif tinggi. Kondisi tersebut menjelaskan mengapa habitat potensial tongkol di Laut Banda lebih banyak ditemukan pada wilayah yang berdekatan dengan gugusan pulau dan daerah yang dipengaruhi pencampuran massa air.

Sebaliknya, rendahnya nilai HSI pada bagian tengah hingga timur Laut Banda diduga berkaitan dengan dominasi karakteristik laut dalam dan kondisi oseanik yang relatif oligotrofik. Wilayah tersebut cenderung memiliki produktivitas permukaan yang lebih rendah dan kondisi lingkungan yang kurang optimal bagi tongkol dibandingkan wilayah barat dan utara. Oleh karena itu, meskipun *E. affinis* masih dapat ditemukan pada sebagian besar wilayah Laut Banda, area yang benar-benar menyediakan kondisi habitat optimum relatif terbatas.

Proyeksi Distribusi Habitat Potensial *Euthynnus affinis* Periode 2030–2040

Hasil proyeksi model ‘*MaxEnt*’ menunjukkan bahwa *Euthynnus affinis* masih berpotensi ditemukan di Laut Banda pada seluruh skenario perubahan iklim periode 2030–2040. Meskipun demikian, terjadi perubahan pada kualitas dan pola distribusi habitat potensial yang ditunjukkan oleh variasi nilai *Habitat Suitability Index* (HSI) antar skenario (**Figure 7**). Secara umum, habitat potensial tongkol didominasi oleh nilai HSI rendah hingga sedang, sedangkan area dengan nilai HSI tinggi hanya ditemukan pada luasan yang relatif terbatas.

Pada seluruh skenario SSP, wilayah dengan tingkat kesesuaian habitat relatif lebih tinggi cenderung terkonsentrasi pada bagian barat hingga barat laut Laut Banda, terutama di sekitar perairan Sulawesi Tenggara, Kepulauan Banggai–Sula, dan sebagian wilayah transisi menuju Laut Maluku. Sebaliknya, bagian tengah, timur, dan tenggara Laut Banda didominasi oleh habitat dengan tingkat kesesuaian rendah. Pola tersebut menunjukkan bahwa perubahan iklim tidak menyebabkan hilangnya habitat tongkol secara langsung, tetapi lebih memengaruhi kualitas habitat dan luas area yang memiliki kondisi lingkungan optimum.

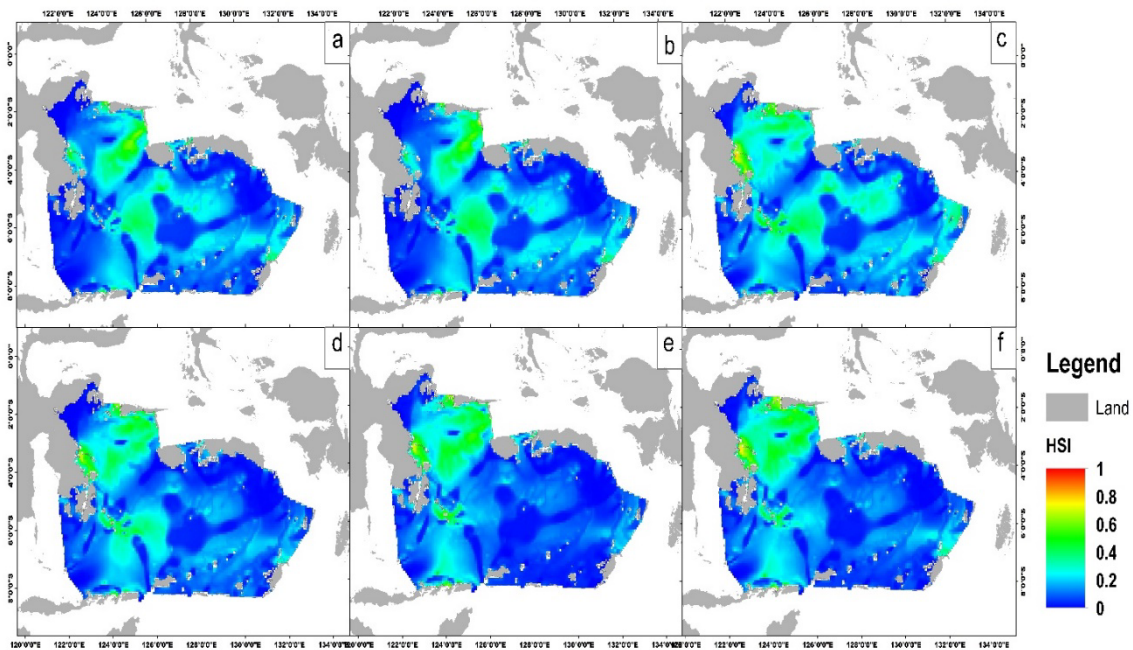


Figure 7 Projection of potential habitat distribution for little tuna based on climate scenarios during 2030–2040 period

- (a) SSP1-1.9;
- (b) SSP1-2.6;
- (c) SSP2-4.5;
- (d) SSP3-7.0;
- (e) SSP4-6.0;
- (f) SSP5-8.5

Gambar 7 Proyeksi distribusi habitat potensial tongkol berdasarkan skenario pada periode waktu 2030-2040

- (a) SSP1-1.9;
- (b) SSP1-2.6;
- (c) SSP2-4.5;
- (d) SSP3-7.0;
- (e) SSP4-6.0;
- (f) SSP5-8.5

Distribusi habitat pada berbagai skenario menunjukkan pola spasial yang relatif serupa. Namun demikian, SSP2-4.5 memperlihatkan kondisi habitat yang relatif lebih baik dibandingkan skenario lainnya. Pada skenario ini, area dengan nilai HSI sedang hingga tinggi terlihat sedikit lebih luas, terutama pada bagian barat laut dan sebagian wilayah tengah-barat Laut Banda. Hasil klasifikasi habitat berdasarkan *Minimum Presence Threshold* (MPT) (**Figure 8**) juga menunjukkan bahwa SSP2-4.5 merupakan satu-satunya skenario yang memiliki luasan habitat kelas *High Suitability* (HS) terbesar, yaitu sekitar 431,70 km² atau 0,07% dari total wilayah penelitian. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa perubahan lingkungan pada SSP2-4.5 masih berada dalam kisaran toleransi ekologis *E. affinis*, sehingga mampu mempertahankan sebagian habitat dengan tingkat kesesuaian yang lebih tinggi.

Sebaliknya, pada SSP3-7.0, SSP4-6.0, dan SSP5-8.5, area dengan tingkat kesesuaian sedang hingga tinggi cenderung semakin berkurang. Habitat dengan nilai HSI rendah semakin mendominasi bagian tengah, timur, tenggara, dan selatan Laut Banda. SSP4-6.0 menunjukkan kondisi yang paling tidak menguntungkan dengan peningkatan habitat kelas *Not Suitable* (NS) hingga mencapai 188.358,23 km² atau sekitar 28,99% dari total wilayah penelitian. Pada skenario ini, luas habitat kelas *Low*

Suitability (LS) juga menurun menjadi sekitar 454.289,50 km² (69,90%), yang menunjukkan terjadinya penurunan kualitas habitat pada sebagian wilayah perairan. Meskipun habitat kelas HS masih muncul pada SSP5-8.5, luasannya sangat kecil yaitu hanya sekitar 345,36 km² (0,05%), sehingga secara ekologis dapat dianggap tidak signifikan.

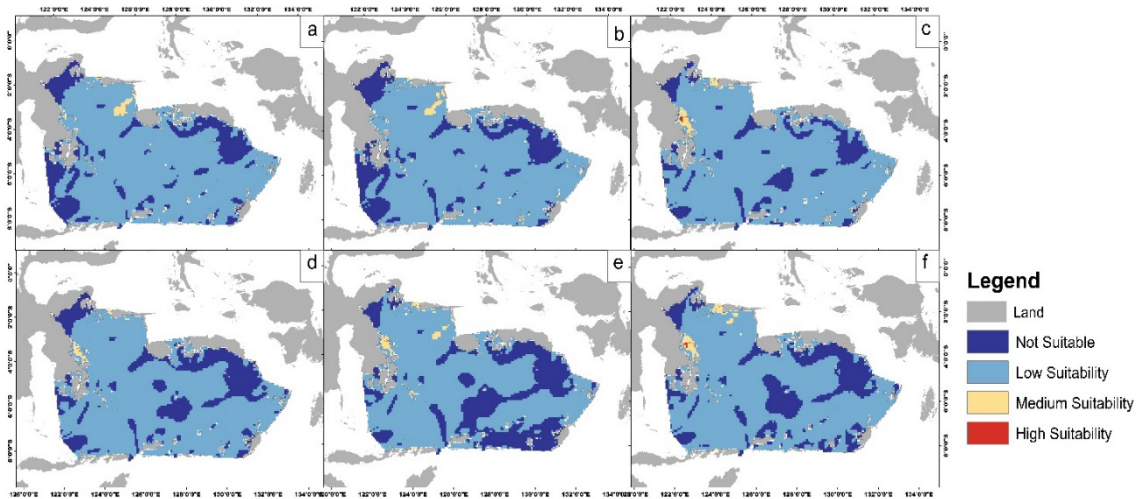


Figure 8 Projected potential habitat classification maps for little tuna based on MPT under climate scenarios during 2030–2040 period

- (a) SSP1-1.9;
- (b) SSP1-2.6;
- (c) SSP2-4.5;
- (d) SSP3-7.0;
- (e) SSP4-6.0;
- (f) SSP5-8.5

Gambar 8 Peta klasifikasi proyeksi distribusi habitat potensial tongkol berdasarkan berdasarkan MPT dalam skenario pada periode waktu 2030–2040

- (a) SSP1-1.9;
- (b) SSP1-2.6;
- (c) SSP2-4.5;
- (d) SSP3-7.0;
- (e) SSP4-6.0;
- (f) SSP5-8.5

Perubahan pola habitat tersebut diduga berkaitan erat dengan perubahan kondisi oseanografi permukaan yang menjadi faktor utama pengontrol distribusi *E. affinis*. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa salinitas dan suhu permukaan laut merupakan variabel lingkungan yang paling berpengaruh terhadap distribusi habitat tongkol. Oleh karena itu, perubahan kedua parameter tersebut akibat perubahan iklim berpotensi menggeser lokasi habitat yang sesuai. Temuan ini sejalan dengan penelitian (Erauskin-Extramiana *et al.*, 2019) yang menyatakan bahwa perubahan suhu, salinitas, oksigen terlarut, dan produktivitas laut dapat memengaruhi distribusi ikan pelagis tropis, terutama pada wilayah yang telah berada dekat dengan batas toleransi lingkungannya. Penelitian (Silva *et al.*, 2025) juga melaporkan bahwa perubahan kondisi oseanografi dapat menyebabkan penurunan kualitas habitat dan pergeseran distribusi berbagai spesies pelagis pada wilayah tropis.

Dominasi habitat kelas *Low Suitability* pada seluruh skenario menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah Laut Banda masih mampu mendukung keberadaan *E. affinis*, namun dengan tingkat kesesuaian yang relatif rendah. Luas habitat kelas *Medium Suitability* dan *High Suitability* yang terbatas mengindikasikan bahwa kondisi lingkungan optimum bagi tongkol pada periode proyeksi

menjadi semakin terbatas. Habitat dengan tingkat kesesuaian lebih baik cenderung bertahan pada bagian barat hingga barat laut Laut Banda, sedangkan bagian timur dan tenggara menunjukkan peningkatan area dengan kesesuaian rendah atau tidak sesuai. Pola tersebut mengindikasikan adanya kemungkinan pergeseran habitat potensial menuju wilayah yang masih memiliki kondisi lingkungan lebih sesuai.

Respons habitat tongkol terhadap perubahan iklim juga menunjukkan pola yang tidak sepenuhnya linear. Munculnya habitat kelas *High Suitability* pada SSP2-4.5 dan sebagian kecil pada SSP5-8.5 menunjukkan bahwa perubahan lingkungan tertentu masih dapat menghasilkan kondisi yang sesuai pada wilayah-wilayah lokal. Fenomena serupa dilaporkan oleh (Dueri *et al.*, 2014) yang menunjukkan bahwa beberapa wilayah oseanik dapat mengalami peningkatan kesesuaian habitat pada fase awal pemanasan sebelum kemudian mengalami penurunan pada skenario pemanasan yang lebih ekstrem. Dengan demikian, dampak perubahan iklim terhadap habitat tongkol tidak hanya ditentukan oleh besarnya peningkatan suhu, tetapi juga oleh interaksi kompleks antara suhu, salinitas, arus, dan dinamika massa air.

Perubahan distribusi habitat potensial *E. affinis* berpotensi memengaruhi pola pemanfaatan sumber daya perikanan di Laut Banda. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa perubahan suhu permukaan laut, produktivitas primer, dan dinamika arus dapat memengaruhi distribusi, migrasi, dan kelimpahan ikan pelagis tropis (Brosset *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2020). Oleh karena itu, perubahan lokasi habitat yang sesuai pada masa mendatang berpotensi menggeser daerah penangkapan tongkol dan memengaruhi efektivitas operasi perikanan tangkap. Informasi proyeksi habitat yang dihasilkan dalam penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar dalam penyusunan strategi adaptasi pengelolaan perikanan yang mempertimbangkan dampak perubahan iklim terhadap sumber daya tongkol di Laut Banda.

KESIMPULAN DAN SARAN

Distribusi habitat potensial *Euthynnus affinis* di Laut Banda terutama dipengaruhi oleh salinitas dan suhu permukaan laut. Model '*MaxEnt*' yang dikembangkan menunjukkan performa yang baik (AUC = 0,794), sehingga mampu menjelaskan hubungan antara kemunculan tongkol dan kondisi oseanografi di wilayah penelitian. Habitat optimum ditemukan pada kisaran salinitas 33–34 PSU, suhu permukaan laut 30–31°C, serta kecepatan arus 0,05–0,20 m s⁻¹. Pada kondisi saat ini, habitat potensial tongkol terkonsentrasi pada bagian barat, barat laut, dan barat daya Laut Banda. Hasil proyeksi periode 2030–2040 menunjukkan bahwa Laut Banda masih berpotensi menjadi habitat bagi *E. affinis* pada seluruh skenario SSP, meskipun terjadi perubahan kualitas dan pola distribusi habitat. Skenario SSP2-4.5 menunjukkan kondisi habitat yang relatif lebih baik dibandingkan skenario lainnya, sedangkan SSP4-6.0 menunjukkan penurunan kesesuaian habitat yang paling besar. Temuan ini menunjukkan bahwa perubahan kondisi oseanografi akibat perubahan iklim berpotensi mengubah distribusi habitat *E. affinis* di Laut Banda, sehingga informasi habitat potensial yang dihasilkan dapat menjadi dasar ilmiah dalam mendukung pengelolaan perikanan yang adaptif terhadap perubahan iklim di Laut Banda.

Berdasarkan hasil penelitian ini, pengelolaan perikanan *E. affinis* di Laut Banda perlu mengintegrasikan informasi distribusi habitat potensial dan proyeksi perubahan iklim ke dalam strategi pengelolaan yang adaptif. Upaya tersebut dapat dilakukan melalui pemantauan berkala terhadap kondisi oseanografi dan distribusi habitat, pemanfaatan informasi habitat potensial sebagai dasar penentuan daerah penangkapan yang dinamis, serta pengembangan sistem peringatan dini berbasis perubahan kondisi lingkungan laut. Pendekatan ini diharapkan dapat meningkatkan ketahanan sektor perikanan terhadap dampak perubahan iklim sekaligus mendukung keberlanjutan pemanfaatan sumber daya ikan pelagis. Rekomendasi ini sejalan dengan FAO yang menekankan pentingnya penerapan *climate-adaptive fisheries management* melalui pengelolaan yang fleksibel, berbasis ekosistem, serta didukung oleh pemantauan lingkungan dan pengambilan keputusan yang adaptif terhadap perubahan distribusi stok ikan (Barange *et al.*, 2018).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia atas data keberadaan spesies (*occurrence data*). Penulis turut berterima kasih kepada Universitas Padjadjaran atas dukungan yang diberikan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Aiello-Lammens, M. E., Boria, R. A., Radosavljevic, A., Vilela, B., & Anderson, R. P. (2015). spThin: an R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography*, 38(5), 541–545. <https://doi.org/10.1111/ecog.01132>
- Assis, J., Fernández Bejarano, S. J., Salazar, V. W., Schepers, L., Gouvêa, L., Fragkopoulou, E., Leclercq, F., Vanhoorne, B., Tyberghein, L., Serrão, E. A., Verbruggen, H., & De Clerck, O. (2024). <scp>Bio-ORACLE</scp> v3.0. Pushing marine data layers to the <scp>CMIP6</scp> Earth System Models of climate change research. *Global Ecology and Biogeography*, 33(4). <https://doi.org/10.1111/geb.13813>
- Bakun, A. (n.d.). *Patterns in the Ocean: Ocean Processes and Marine Population Dynamics*.
- Barange, M., Bahri, T., Beveridge, M. C. M., Cochrane, K. L., Funge-Smith, S., & Poulain, F. (2018). *Impacts of climate change on fisheries and aquaculture Synthesis of current knowledge, adaptation and mitigation options* (1st ed.). FAO.
- Brosset, P., Fromentin, J.-M., Van Beveren, E., Lloret, J., Marques, V., Basilone, G., Bonanno, A., Carpi, P., Donato, F., Čikeš Keč, V., De Felice, A., Ferreri, R., Gašparević, D., Giráldez, A., Gücü, A., Iglesias, M., Leonori, I., Palomera, I., Somarakis, S., Saraux, C. (2017). Spatio-temporal patterns and environmental controls of small pelagic fish body condition from contrasted Mediterranean areas. *Progress in Oceanography*, 151, 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2016.12.002>
- Cheung, W. W. L., Lam, V. W. Y., Sarmiento, J. L., Kearney, K., Watson, R., & Pauly, D. (2009). Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenarios. *Fish and Fisheries*, 10(3), 235–251. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2008.00315.x>
- Dueri, S., Bopp, L., & Maury, O. (2014). Projecting the impacts of climate change on skipjack tuna abundance and spatial distribution. *Global Change Biology*, 20(3), 742–753. <https://doi.org/10.1111/gcb.12460>
- Elith, J., & Leathwick, J. R. (2009). Species distribution models: Ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40, 677–697. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159>
- Erauskin-Extramiana, M., Arrizabalaga, H., Hobday, A. J., Cabré, A., Ibaibarriaga, L., Arregui, I., Murua, H., & Chust, G. (2019). Large-scale distribution of tuna species in a warming ocean. *Global Change Biology*, 25(6), 2043–2060. <https://doi.org/10.1111/gcb.14630>
- Erauskin-Extramiana, M., Chust, G., Arrizabalaga, H., Cheung, W. W. L., Santiago, J., Merino, G., & Fernandes-Salvador, J. A. (2023). Implications for the global tuna fishing industry of climate change-driven alterations in productivity and body sizes. *Global and Planetary Change*, 222, 104055. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2023.104055>
- Furkan, A., Soraya, I., Handayani, C., Risal, L. S., Satriawan, H., & Basuptura, O. B. (2024). Pemetaan Zona Potensial Penangkapan Ikan Tongkol Berdasarkan Suhu Permukaan Laut dan Klorofil-a Menggunakan Ocean Color di Selat Lombok. *Jurnal Akuatik lestari*, 8(1), 102–109. <https://doi.org/10.31629/akuatiklestari.v8i1.7211>

- Gunarso, W. (1985). *Tingkah Laku Ikan dalam Hubungannya dengan Alat, Metode dan Taktik Penangkapan*. Fakultas Perikanan. Institut Pertanian Bogor.
- Ismail, M. F. A., Taofiqurohman, A., & Purwandana, A. (2020). Circulation dynamics of the Banda Sea estimated from argo profiles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 584(1), 012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/584/1/012017>
- Latifah, A. L., Wulandari, S. Y., & Kunarso, K. (2024). Hubungan Suhu Permukaan Laut (SPL) dan Klorofil-a Terhadap Hasil Tangkapan Yellowfin Tuna (*Thunnus albacares*) yang Didaratkan di Pelabuhan Tamperan, Pacitan. *Indonesian Journal of Oceanography*, 6(3), 197–208. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v6i3.20575>
- Liu, S., Liu, Y., Alabia, I. D., Tian, Y., Ye, Z., Yu, H., Li, J., & Cheng, J. (2020). Impact of Climate Change on Wintering Ground of Japanese Anchovy (*Engraulis japonicus*) Using Marine Geospatial Statistics. *Frontiers in Marine Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00604>
- Lubis, M. Z., Hidayat, S., & Hu, S. (2025). Indonesian Throughflow in the Halmahera Sea: A Review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(10), 1974. <https://doi.org/10.3390/jmse13101974>
- Maghfiroh, V., & Zainuri, M. (2023). Analisa Tingkat Pemanfaatan Ikan Tongkol (*Euthynnus affinis*) Di Perairan Pasongsongan Dan Sekitarnya, Kabupaten Sumenep, Madura. *Juvenil: Jurnal Ilmiah Kelautan Dan Perikanan*, 4(3), 158–166. <https://doi.org/10.21107/juvenil.v4i3.20008>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., Dudík, M., Schapire, R. E., & Blair, M. E. (2017). Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography*, 40(7), 887–893. <https://doi.org/10.1111/ecog.03049>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3), 231–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Phillips, S. J., & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31(2), 161–175. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x>
- Phillips, S. J., Dudík, M., Elith, J., Graham, C. H., Lehmann, A., Leathwick, J., & Ferrier, S. (2009). Sample selection bias and presence-only distribution models: implications for background and pseudo-absence data. *Ecological Applications*, 19(1), 181–197. <https://doi.org/10.1890/07-2153.1>
- Pratama, G. B., Nurani, T. W., Mustaruddin, M., & Herdiyeni, Y. (2023). Pemodelan Kesesuaian Habitat Ikan Pelagis Berbasis Kondisi Oseanografi Di Perairan Palabuhanratu. *BAWAL Widya Riset Perikanan Tangkap*, 14(3), 161. <https://doi.org/10.15578/bawal.14.3.2022.161-171>
- Satrioajie, W. N., Suyadi, Syahailatua, A., & Wouthuyzen, S. (2018). The importance of the Banda Sea for tuna conservation area: A review of studies on the biology and the ecology of tuna. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 184, 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/184/1/012004>
- Sharifian, S., Mortazavi, M. S., & Nozar, S. L. M. (2023). Predicting present spatial distribution and habitat preferences of commercial fishes using a maximum entropy approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(30), 75300–75313. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27467-3>
- Silva, P. M., Borges, F. O., Pita, C., Costa, J. L., & Teixeira, C. M. (2025). Projecting climate change impacts on the distribution of the most captured tuna species on Atlantic waters. *Biodiversity and Conservation*, 34(10), 3633–3656. <https://doi.org/10.1007/s10531-025-03121-x>

- Snyder, S., Franks, P. J. S., Talley, L. D., Xu, Y., & Kohin, S. (2017). Crossing the line: Tunas actively exploit submesoscale fronts to enhance foraging success. *Limnology and Oceanography Letters*, 2(5), 187–194. <https://doi.org/10.1002/lol2.10049>
- Syamsuddin, M. L., Puspita, A. R., Sunarto, S., & Ismail, M. R. (2025). Potential Impacts of Ocean Warming on Habitat Preferences of the Eastern Little Tuna (*Euthynnus affinis*) in the Makassar Strait. *Polish Journal of Environmental Studies*, XX(X), 1–14. <https://doi.org/10.15244/pjoes/203356>
- Syamsuddin, M., Sunarto, & Yuliadi, L. (2018). Oceanographic factors related to Eastern Little Tuna (*Euthynnus affinis*) catches in the west Java Sea. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 162, 012044. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/162/1/012044>
- Uneputty, B. A. S., Tubalawony, S., & Noya, Y. A. (2022). Klorofil-a dan kaitannya terhadap Produktifitas Primer Perairan Laut Banda pada Fenomena La Nina. *NEKTON: Jurnal Perikanan Dan Ilmu Kelautan*, 2(1), 57–65. <https://doi.org/10.47767/nekton.v2i1.326>
- Vayghan, A. H., Lee, M.-A., Weng, J.-S., Mondal, S., Lin, C.-T., & Wang, Y.-C. (2020). Multisatellite-Based Feeding Habitat Suitability Modeling of Albacore Tuna in the Southern Atlantic Ocean. *Remote Sensing*, 12(16), 2515. <https://doi.org/10.3390/rs12162515>
- Wagiyo, K., Pane, A. R., & Chodriah, U. (2018). Parameter Populasi, Aspek Biologi dan Penangkapan Tongkol Komo (*Euthynnus affinis* Cantor, 1849) di Selat Malaka. *Jurnal Penelitian Perikanan Indonesia*, 23(4), 287. <https://doi.org/10.15578/jppi.23.4.2017.287-297>
- Wilayah Pengelolaan Perikanan Negara Republik Indonesia (Peraturan Menteri Kelautan Dan Perikanan No. 18/PERMEN-KP/2014). Jakarta: KKP., Pub. L. 18 (2014).
- Wyrtki, K., *Oceanography, S. I. of, & (1959-1961)*, N. E. (1961). *Physical oceanography of the Southeast Asian waters*. University of California, Scripps Institution of Oceanography. <https://catalog.hathitrust.org/Record/001878593>