



BAB 7

Implikasi *Upwelling* terhadap Produktivitas Perikanan Laut di Indonesia dan Upaya Konservasinya

Augy Syahailatua, Sam Wouthuyzen

A. Kondisi Lingkungan Laut Menentukan Kehidupan Ikan

Indonesia merupakan negara kepulauan dengan luas wilayah laut yang dominan. Diperkirakan 70% dari luas wilayah Negara Kesatuan Republik Indonesia adalah lautan yang memiliki potensi sumber daya hayati dan nonhayati yang melimpah. Sebagian dari sumber daya laut tersebut telah dimanfaatkan bagi kesejahteraan masyarakat dan bangsa Indonesia, tetapi masih banyak sumber daya laut yang belum digarap secara optimal, bahkan kemungkinan besar belum diketahui, terutama di wilayah laut yang dalam (lebih dari 200 m). Dengan demikian, sumber daya laut di Indonesia masih merupakan salah satu aset penting bagi masa depan bangsa.

A. Syahailatua* & S. Wouthuyzen

*Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail*: augy001@brin.go.id

© 2023 Editor & Penulis

Syahailatua, A., & Wouthuyzen, S. (2023). Implikasi *upwelling* terhadap produktivitas perikanan laut di Indonesia dan upaya konservasinya. Dalam K. Amri, H. Latuconsina, & R. Triyanti (Ed.), *Pengelolaan sumber daya perikanan laut berkelanjutan* (221–266). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.908.c758 E-ISBN: 978-623-8372-50-8

Sumber daya ikan laut merupakan salah satu potensi ekonomi kelautan yang penting (Suman et al., 2016) dan telah dimanfaatkan oleh bangsa Indonesia. Cadangan stok perikanan pernah mencapai 7,7 juta ton pada tahun 1990, kemudian pada tahun 1995 menjadi 3,67 juta ton, dan pada tahun 2013 adalah sebesar 6,5 juta ton (Kementerian PPN, 2013). Pada tahun 2017, informasi tentang stok ikan direvisi dan kemudian pada tahun 2022, Kementerian Kelautan dan Perikanan kembali merevisi data estimasi potensi ikan, dengan jumlah total 12,01 juta ton per tahun yang tersebar di sebelas Wilayah Pengelolaan Perikanan (WPP) dan jumlah tangkapan yang diperbolehkan (JTB) sebesar 8,6 juta ton per tahun yang tingkat eksploitasinya berbeda-beda di setiap WPP (Kepmen KP No. 19, 2022). Ada kecenderungan kondisi tangkap lebih (*overexploited*) yang dihadapi oleh usaha perikanan di Indonesia dan hal ini serupa dengan kondisi usaha perikanan secara global (FAO, 2014). Hasil analisis juga menyatakan stok sumber daya ikan tuna dan cakalang mengalami penurunan sebesar 2.828 ton per tahun selama periode 1992–2015, dengan nilai potensi kerugian atau kehilangan akibat penurunan stok mencapai 131,89 miliar rupiah per tahun (Firdaus et al., 2018). Di samping itu, pernah dicatat pada tahun 2014 bahwa ada indikasi penurunan produk olahan hasil perikanan yang pada tahun 2008 sebesar 40% dari produk perikanan nasional, menjadi hanya 20%–30% pada tahun 2013 (Kiara, 2014). Umumnya, kecenderungan penurunan produk hasil perikanan terjadi secara global maupun nasional dan untuk itu perlu adanya upaya yang lebih serius dalam pengelolaan sumber daya perikanan berkelanjutan.

Ikan laut merupakan salah satu sumber daya alam yang penting terutama sebagai sumber protein hewani bagi masyarakat Indonesia. Berdasarkan informasi dari Fishbase, sebuah basis data daring spesies ikan secara global, di perairan Indonesia tercatat ada 4.715 jenis ikan dan 3.590 jenis hidup di laut (Froese & Pauly, 2022). Namun, jumlah jenis ikan yang biasanya dikonsumsi tercatat hanya 703 spesies. Ini berarti, hanya 14,9% dari jumlah total jenis ikan di Indonesia yang secara implisit perlu mendapat perhatian secara khusus.

Perhatian khusus perlu diberikan agar sumber daya ikan-ikan ini dapat dimanfaatkan secara bijaksana sesuai dengan kaidah-kaidah pemanfaatan yang berkelanjutan.

Seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi kelautan, telah diketahui bahwa proses-proses biologi ikan (reproduksi, pertumbuhan, pola makan, dan ruaya) sangat berhubungan erat dengan kondisi lingkungan di mana ikan tersebut hidup. Perlu ditambahkan bahwa kondisi lingkungan laut sangat ditentukan oleh berbagai dinamika laut yang terjadi terutama posisi matahari terhadap permukaan bumi yang memicu terjadinya perubahan pergerakan angin dan perubahan musim. Dengan demikian, lingkungan laut memiliki peranan penting dalam menentukan kelangsungan hidup dari ikan laut dan pada akhirnya menentukan stok perikanan.

Bab ini akan fokus membahas fenomena *upwelling*, yakni salah satu kondisi lingkungan laut yang turut menentukan keberlangsungan hidup awal dari ikan pada fase larva dan juvenil sehingga fenomena ini mesti menjadi salah satu fokus riset kelautan yang terkait dengan konservasi sumber daya ikan (Syahailatua, 2022). Observasi fenomena *upwelling* dapat dipelajari dengan melakukan pengukuran suhu laut, salinitas, dan produktivitas perairan terutama nitrogen dan fosfat (Ilahude, 1970; Wyrcki, 1958). Beberapa lokasi kejadian *upwelling* di Indonesia telah diketahui dengan baik, seperti di Laut Banda, Laut Arafura, Selat Makassar, dan selatan Jawa (Nontji, 1987; Susanto et al., 2001).

B. Kondisi Oseanografi Perairan Indonesia

Wilayah Indonesia yang terletak pada zona khatulistiwa cenderung memiliki kondisi oseanografi yang lebih stabil dengan sedikit variasi dibandingkan wilayah yang berada di lintang tinggi atau daerah bermusim sedang dan dingin. Umumnya, dua pola angin utama yang memengaruhi kondisi oseanografi di Indonesia, yaitu angin musim timur (*east monsoon*) dan angin musim barat (*west monsoon*)

yang kemudian lebih dikenal dengan musim timur dan musim barat (Nontji, 1987). Saat musim timur, angin berembus lebih banyak dari wilayah Indonesia bagian timur ke arah barat. Hal ini diakibatkan terjadinya tekanan tinggi di Benua Australia dan sebaliknya tekanan rendah di Benua Asia. Sementara pada musim barat terjadi sebaliknya, dimana angin berembus dari arah barat ke timur sebagai akibat dari tekanan tinggi di Benua Asia dan tekanan rendah di benua Australia. Musim timur terjadi pada bulan Juni–Agustus, sedangkan musim barat pada bulan Desember–Februari. Pada bulan Maret–Mei, dan September–November, masing-masing disebut sebagai musim peralihan atau dikenal juga dengan istilah pancaroba. Kecepatan angin di wilayah Indonesia rata-rata adalah 2,5–3.5 m/detik (Nontji, 1987).

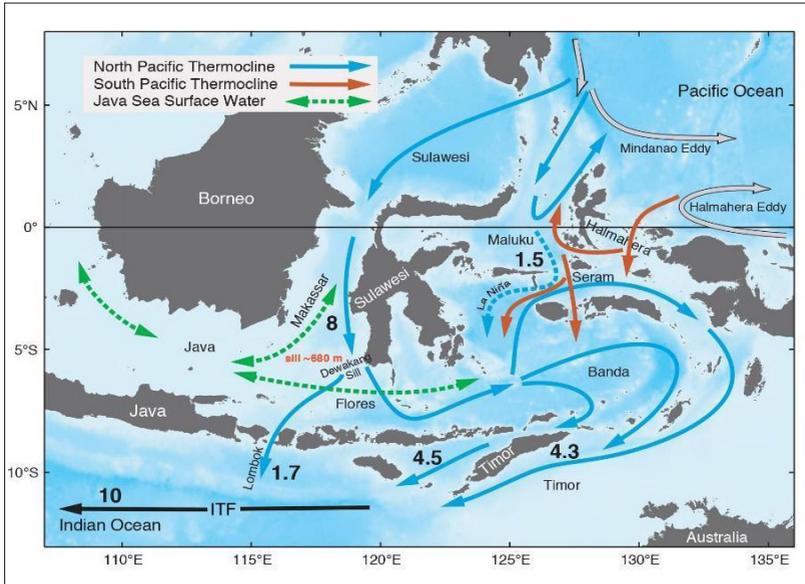
Arah angin yang berembus silih berganti setiap tiga bulan di wilayah Indonesia mengakibatkan pola arus laut, terutama di permukaan laut, juga mengalami perubahan arah dan kecepatannya. Akibatnya, kondisi oseanografi di perairan Indonesia sangat dipengaruhi oleh pola arus yang terjadi pada musim timur dan musim barat. Sebagaimana arah angin yang terjadi selama kedua musim tersebut, arus laut juga menunjukkan pola yang searah dengan arah angin. Oleh karena itu, pada musim timur arus laut bergerak dari timur atau tenggara ke barat Indonesia, sedangkan di musim barat, arus bergerak dari barat ke timur Indonesia (Ilahude, 1970, 1978; Nontji, 1987; Wyrтки, 1958, 1961).

Suhu dan salinitas di perairan Indonesia merupakan dua faktor oseanografi yang paling sering diamati dalam berbagai penelitian laut. Kedua faktor ini dapat memberikan indikasi sumber massa air laut yang berada di suatu perairan. Suhu air laut sangat dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari yang diterima oleh permukaan laut, sedangkan salinitas lebih dipengaruhi oleh aliran air tawar yang masuk ke laut. Biasanya di musim penghujan, kondisi suhu dan salinitas agak menurun dari kondisi normal. Sebaliknya, di musim panas, suhu dan salinitas agak meningkat. Suhu permukaan laut di wilayah Indonesia berkisar antara 28–31°C, tetapi pada saat kejadian tertentu, seperti

upwelling, suhu permukaan dapat turun menjadi 25°C (Nontji, 1987; Wyrтки, 1958, 1961). Suhu akan menurun sesuai dengan stratifikasi kedalaman dan secara umum pada kedalaman lebih dari 1000 m, suhu air laut biasanya kurang dari 5°C. Sementara itu, salinitas di perairan Indonesia, rata-rata berkisar antara 30‰–34‰ dan sangat bervariasi antara satu wilayah dan wilayah lain. Sebagai contoh, rata-rata salinitas di Selat Malaka adalah 30‰, sedangkan di Laut Banda adalah 34‰ (Nontji, 1987).

Sejak dekade 90-an, peneliti kelautan banyak melakukan observasi laut terkait dengan *Arus Lintas Indonesia* atau dikenal dengan sebutan arlindo, atau sering disebut dalam bahasa Inggris *Indonesian throughflow* (ITF). Sampai saat ini, arlindo masih terus dikaji, dan sudah banyak publikasi ilmiah yang mengungkapkan secara detail tentang arlindo (Gordon, 2005; Gordon & Fine, 1996; Gordon et al., 1999; Gordon et al., 2003; Gordon et al., 2008). Arus ini tergolong sebagai arus perairan dalam yang bergerak dari Samudra Pasifik melewati perairan Indonesia menuju Samudra Hindia (Gambar 7.1). Kecepatannya diperkirakan sebesar 8–14 Sv (Gordon, 2005) dan dipengaruhi oleh kondisi atmosfer terutama fenomena El Niño dan La Niña. Tambahan lagi, hasil riset mengenai pengaruh El Niño dan La Niña terhadap perikanan pelagis di Laut Jawa menunjukkan bahwa pada periode La Niña, musim penangkapan ikan pelagis lebih panjang dibandingkan saat periode El Niño (Kasim et al., 2011).

Pada saat fenomena El Niño, kecepatan arlindo agak melemah, sedangkan pada saat La Niña, kecepatannya lebih menguat (Gordon, 2005). Selanjutnya, arlindo juga berperan penting di beberapa lokasi utama *upwelling* di Indonesia karena lokasi-lokasi tersebut berada pada lintasan arlindo, seperti Laut Maluku, Laut Banda, Laut Arafura dan Laut Flores. Namun, belum banyak diungkapkan secara detail bagaimana dampak dari arlindo dan fenomena *upwelling* bagi pengayaan unsur hara di perairan-perairan tersebut dan implikasinya bagi perikanan.



Keterangan: Massa air dari Pasifik utara (biru), Pasifik selatan (merah), dan Laut Jawa (hijau). Angka menunjukkan jumlah massa air yang dipindahkan per detik dalam Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{detik}$).

Sumber: Gordon (2005)

Gambar 7.1 Peta Arus Lintas Indonesia (Arlindo)

C. Fenomena *Upwelling*

Rotasi dan evolusi bumi mengakibatkan perubahan posisi permukaan bumi terhadap matahari. Situasi ini mengakibatkan suhu di permukaan bumi berubah-ubah sesuai dengan potensi dan lama radiasi matahari yang diterima. Perubahan suhu permukaan bumi mengakibatkan perubahan suhu udara dan mendorong terjadinya pergerakan udara. Selanjutnya, pergerakan udara yang lazimnya disebut angin mengakibatkan pergerakan massa air laut atau yang dikenal dengan istilah arus laut.

Di Indonesia, pergerakan arus laut ada yang bersifat horizontal, seperti arlindo, tetapi ada juga pergerakan arus yang bersifat vertikal, yaitu yang dikenal dengan istilah *upwelling* (taikan massa air) atau

downwelling (penenggelaman massa air). Arus yang bersifat horizontal maupun vertikal sangat memengaruhi kehidupan organisme di laut, termasuk sumber daya ikan. Migrasi ikan laut sangat dipengaruhi oleh pola arus laut karena hal ini juga berhubungan erat dengan distribusi dan kelimpahan pakan alamiah bagi ikan-ikan di laut. Dengan demikian, pengetahuan tentang peranan faktor oseanografi, seperti arus di laut bagi kelangsungan kehidupan ikan, menjadi sangat penting untuk diketahui dan dipahami.

Penaikan massa air atau taikan air atau yang lebih dikenal dengan istilah *upwelling* terjadi di laut ketika massa air berpindah dari lapisan jeluk (dalam) ke bagian permukaan. Pada mekanisme *upwelling*, massa air laut membawa serta suhu air laut yang agak dingin dan juga unsur-unsur hara yang terkandung pada dasar perairan dan kolom air laut tersebut (Largier, 2020; Mann & Lazier, 1996; Sverdrup et al., 1970). Akibatnya lokasi *upwelling* akan memiliki suhu permukaan yang relatif lebih rendah dari suhu permukaan air laut secara umum, tetapi mengandung konsentrasi unsur hara yang lebih tinggi dibandingkan lokasi di sekitarnya, menjadikan daerah ini memiliki tingkat produktivitas perairan yang tinggi (Mann & Lazier, 1996; Sverdrup et al., 1970).

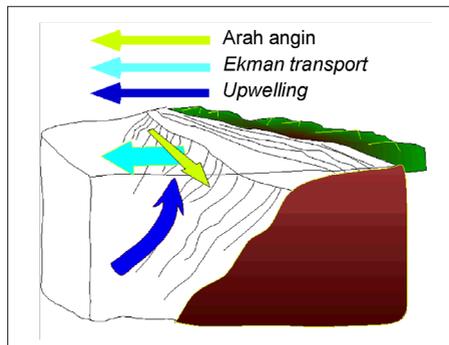
Upwelling dapat terjadi dengan beberapa mekanisme (Barnes & Hughes, 1988), sebagai berikut.

- 1) Apabila arus di dekat dasar laut bergerak cepat dan melewati rintangan akibat perbedaan kontur dasar laut, massa air akan terdorong ke permukaan laut.
- 2) Apabila terjadi pergerakan dua massa air laut secara berdampingan di wilayah Khatulistiwa—akibat gaya Coriolis, massa air laut di utara Khatulistiwa akan bergerak ke arah utara dan massa air di sebelah selatan Khatulistiwa akan bergerak ke arah selatan—kekosongan kolom air laut di permukaan akan diisi oleh air laut dari bagian bawah.
- 3) Apabila terjadi pergerakan air laut yang menjauhi daerah pantai, air laut di bagian bawah akan mengisi bagian permukaan yang kosong.

Sementara itu, apabila dilihat dari periode dan proses kejadiannya, ada tiga jenis *upwelling*, yaitu

- 1) periode tetap, yang terjadi sepanjang tahun dengan intensitas yang bervariasi, contohnya di perairan lepas pantai Peru (Amerika Selatan);
- 2) periode semusim (berkala), yang terjadi hanya pada musim tertentu, contohnya di selatan Jawa; dan
- 3) periode silih berganti (*alternating*), terjadi karena kenaikan air (*upwelling*) pada musim timur (*east monsoon*) disusul oleh penenggelaman air permukaan (*downwelling*) pada musim barat (*west monsoon*), contohnya di Laut Banda (Nontji, 1987).

Dengan demikian, kecepatan arus laut dan kondisi topografi dasar laut turut menentukan proses terjadinya *upwelling*, tetapi angin merupakan faktor utama penyebab terjadinya *upwelling* (Gambar 7.2).



Sumber: National Oceanographic (2017)

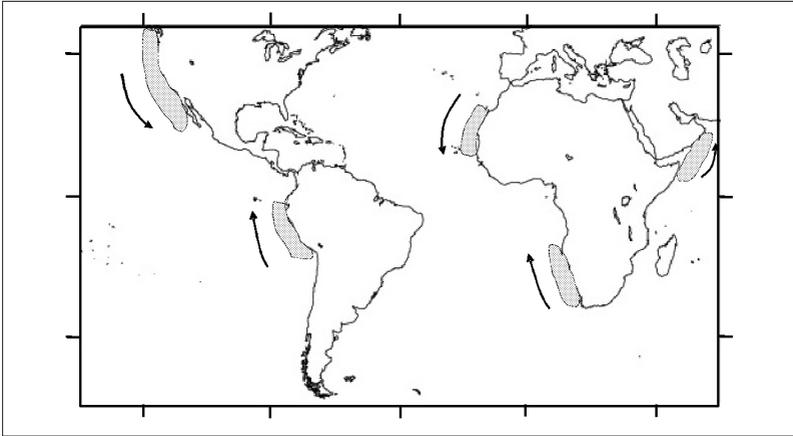
Gambar 7.2. Ilustrasi Mekanisme *Upwelling* yang Terjadi di Wilayah Pesisir Umumnya Ditentukan oleh Kecepatan dan Arah Angin serta *Ekman Transport*

Tingginya konsentrasi unsur hara di lokasi *upwelling*, terutama nitrat dan fosfat, dan laju fotosintesis yang bersumber dari sinar matahari menjadikan daerah *upwelling* sangat subur. Beberapa

penelitian memperkirakan peningkatan kesuburan perairan saat kejadian *upwelling* dapat mencapai sepuluh kali lipat dari kondisi normal (Mann & Lazier, 1996). Biasanya, kesuburan perairan tersebut turut memicu pertumbuhan fitoplankton (Chavez & Smith, 1994; Hallegraeff & Jeffrey, 1993) dan kelimpahan zooplankton (Hutchings et al., 1994). Secara umum, respons fitoplankton terhadap unsur hara terjadi lebih cepat dibandingkan dengan zooplankton (Hutchings et al., 1994; Mann & Lazier, 1996). Di samping itu, laju pertumbuhan *nauplii* menjadi kopepoda lebih cepat pada wilayah yang lebih hangat pada daerah lintang rendah dibandingkan wilayah yang lebih dingin di lintang tinggi (Steidinger & Walker, 1984). Perlu juga dicatat bahwa pertumbuhan cepat fitoplankton di lokasi *upwelling* dapat terjadi dalam 6–12 hari (Hutchings et al., 1994), sedangkan pertumbuhan *nauplii* atau *copepodites* menjadi dewasa pada suhu air laut antara 11–18°C dapat terjadi dalam 14–40 hari (Hutchings et al., 1994; Mann & Lazier, 1996).

Beberapa lokasi *upwelling* utama di dunia (Gambar 7.3) telah memiliki informasi yang lengkap karena sejak beberapa dekade lalu telah menjadi perhatian para ahli kelautan untuk riset-riset yang terkait dengan tingkat produktivitas perairan dan perikanan. Adapun lokasi-lokasi tersebut meliputi wilayah lepas pantai barat Amerika, dengan sistem arus California; lepas pantai semenanjung Iberia dan Afrika barat daya, dengan sistem arus Canary; pantai barat Afrika Selatan, dengan sistem arus Benguela; pantai barat Amerika Selatan, dengan sistem arus Peru; dan Samudra Hindia bagian barat, dengan sistem arus Somali (Mann & Lazier, 1996; Largier, 2020).

Pada semua lokasi utama ini, kejadian *upwelling* cenderung terjadi dengan frekuensi yang tinggi pada musim semi–panas dan merupakan daerah penangkapan ikan yang potensial. Perairan lepas pantai California (Amerika Serikat) merupakan daerah penangkapan *Sardinops* yang baik (Rykaczewski & Chekley Jr., 2008), begitu juga dengan lepas pantai Peru yang merupakan daerah penangkapan *anchovy*. Sementara itu, di pantai barat Afrika, jenis *Sardinella* spp. merupakan jenis ikan yang sangat dominan tertangkap (Mann &



Keterangan: → = arah angin

Sumber: Mann dan Lazier (1996)

Gambar 7.3 Lokasi Utama *Upwelling* yang Sering Mendapat Perhatian Para Peneliti Oseanografi di Dunia

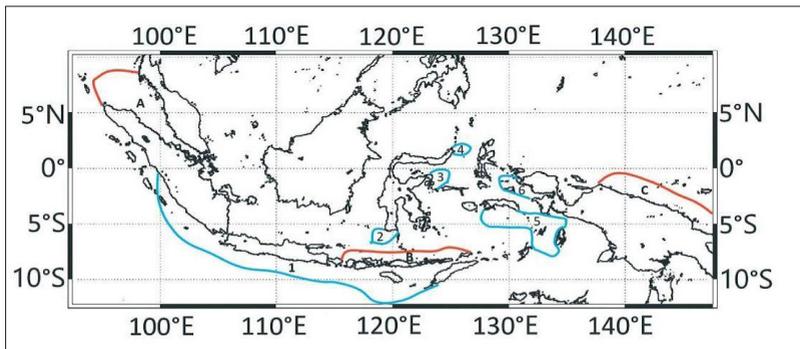
Lazier, 1996). Kelimpahan ikan-ikan pelagis kecil ini sangat berguna untuk mendukung industri perikanan karena umumnya jenis-jenis ikan tersebut dipergunakan untuk bahan baku tepung ikan, suplemen untuk pakan ternak, dan ikan umpan dalam perikanan tuna dan cakalang.

D. *Upwelling* di Indonesia

Fenomena *upwelling* di Indonesia pertama kali dilaporkan oleh Dr. Klaus Wyrтки di Laut Banda (Wyrтки, 1958), kemudian dilaporkan terjadi di Selat Makassar oleh P.Ch. Veen berdasarkan data suhu dan salinitas (Nontji, 1987), dan juga di Laut Arafura (Rochford, 1962). Umumnya, *upwelling* terjadi di Indonesia pada musim timur (*east monsoon*), di mana angin bertiup dari arah timur/tenggara ke barat/barat laut Indonesia. Fenomena ini terekam dengan intensitas yang cukup tinggi di Indonesia pada bulan Mei sampai dengan September. Namun, sebenarnya *upwelling* juga terjadi di saat musim barat (*west*

monsoon) di mana angin bertiup dari arah barat/barat laut ke arah timur/tenggara Indonesia (Wirasatriya et al., 2021).

Walaupun sudah diketahui sejak awal tahun 1960-an, *upwelling* baru mulai diobservasi secara lebih baik pada akhir dekade 60-an, yaitu dalam rangka pelaksanaan Program Pembangunan Lima Tahun Tahap I s/d VI. Dr. A.G. Ilahude dan rekan-rekan peneliti dari Lembaga Oseanologi Nasional (sekarang Pusat Riset Oseanografi BRIN) melaksanakan program penelitian oseanografi dengan memberikan perhatian khusus pada proses dan mekanisme *upwelling*. Parameter oseanografi yang diobservasi tidak hanya suhu dan salinitas air laut, tetapi juga diperluas dengan aspek kimia dan biologi khususnya konsentrasi fosfat, nitrat, silikat, kadar klorofil, serta kelimpahan fitoplankton dan zooplankton. Selanjutnya, pada pelaksanaan ekspedisi Snellius II (1984–1985) dan ekspedisi Arlindo Circulation (1993–1994), pengamatan *upwelling* diperluas lagi dengan parameter kelimpahan ikan pelagis yang dideteksi dengan menggunakan *acoustic fish finder*. Hasilnya menunjukkan bahwa *upwelling* tidak hanya terjadi di Laut Banda, Selat Makassar, dan perairan selatan Jawa, tetapi ada indikasi *upwelling* juga terjadi di Laut



Keterangan: Biru: Angin monsun timur/tenggara; Merah: Angin monsun barat/barat daya
Sumber: Nontji (1987), Wirasatriya et al. (2021)

Gambar 7.4 Lokasi *Upwelling* di Perairan Indonesia yang Terjadi karena Pengaruh Angin

Seram, Laut Halmahera, Laut Maluku, Laut Arafura, dan perairan utara Papua (Gambar 7.4). Selanjutnya, beberapa peneliti kelautan juga menyatakan bahwa *upwelling* terjadi pada saat musim barat (*west monsoon*), tetapi intensitasnya tidak sekuat *upwelling* pada musim timur/tenggara (Wirasatriya et al., 2021).

Sebagaimana telah diketahui, fenomena *upwelling* menaikkan massa air dari perairan dalam yang memiliki ciri suhu rendah, salinitas tinggi, kadar oksigen terlarut rendah, unsur hara (nutrien)



Keterangan: Botol Nansen dipasang termometer untuk mendapatkan pembacaan suhu di berbagai kedalaman di laut, botol Niskin digunakan untuk koleksi sampel air, jaring untuk mengambil sampel fitoplankton dan zooplankton, dan cakram Secchi digunakan untuk mengukur kecerahan perairan.

Foto: Dokumentasi Lembaga Oseanologi Nusantara LIPI (1990)

Gambar 7.5 Survei “klasik” oseanografi dengan peralatan sederhana untuk mempelajari fenomena *upwelling* di Laut Banda dan Laut Seram tahun 1996–1997 menggunakan Kapal Riset Rd. Soerjaatmadja milik Lembaga Oseanologi Nasional LIPI, Stasiun Penelitian Ambon.

tinggi ke lapisan permukaan perairan (Era et al., 2012; Susanto et al., 2001; Wouthuyzen et al., 2020). Oleh karena itu, indikator *upwelling* dapat ditandai dengan rendahnya suhu permukaan laut (*sea surface temperature*, SST), tingginya salinitas permukaan laut (*sea surface salinity*, SSS), rendahnya kadar oksigen terlarut (*dissolved oxygen*, DO), tingginya nutrisi (nitrat dan fosfat), serta diikuti tingginya konsentrasi klorofil-a (CHL-a) pada lapisan permukaan laut dibanding dengan kondisi perairan di sekitarnya. Indikator terjadinya fenomena *upwelling* dapat ditunjukkan melalui hasil pengukuran beberapa parameter oseanografi fisika dan kimia yang diperoleh dengan menggunakan metodologi klasik (penggunaan peralatan pengukuran yang sederhana, seperti botol Nansen, pada Tabel 7.1 dan Gambar 7.5). Belakangan ini, parameter seperti SST dan konsentrasi CHL-a pada lapisan permukaan laut merupakan parameter yang dapat dipantau dengan sangat mudah melalui teknologi penginderaan jauh (*remote sensing*) seperti pada Gambar 7.6.

Selain metode survei klasik, tiga parameter oseanografi untuk seluruh perairan Indonesia yang diperoleh dari data citra satelit TERRA MODIS dengan resolusi spasial 4 km dapat menunjukkan pola sebaran suhu, salinitas permukaan, serta konsentrasi klorofil-a (Gambar 7.6). Data ini dapat diunduh secara cuma-cuma dari website NASA (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/>). Parameter tersebut adalah konsentrasi klorofil-a (panel kiri A, B, C dan D), SST (panel tengah, E, F, G dan H), dan SSS (panel kanan, I, J, K dan L). Parameter SSS dipetakan menggunakan data *absorption due to gelbstof and detrital material* pada panjang gelombang 443 nm (nanometer; ADG 443) atau dikenal sebagai *color dissolve organic matter* (CDOM) yang dapat digunakan sebagai *proxy* untuk menduga SSS.

$$SSS = -3785911.089 \cdot X^5 + 953272.767 \cdot X^4 - 69540.078 \cdot X^3 + 888.056 \cdot X^2 + 28.361 \cdot X + 33.860;$$

keterangan: X = ADG443 (Wouthuyzen et al., 2020).

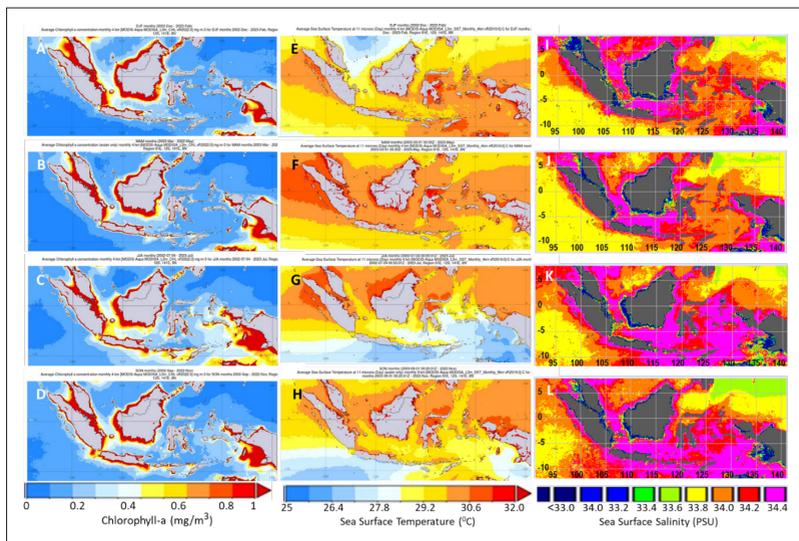
Tabel 7.1 Data Oseanografi Hasil Survei Klasik Fenomena *Upwelling* pada Pelayaran K/R Rd Soerjatmadja di Laut Banda dan Laut Seram

Banda Sea (St. 1 – 33)					Seram Sea (St. 34 – 48)				
Depth	Mei '96	Ag.	Nov.	Jan '97	Mei '96	Ag.	Nov.	Jan '97	
SST (° C)									
0	28.67	27.26	29.14	29.32	29.01	28.63	28.90	29.13	
25	28.49	26.71	28.06	28.65	28.51	28.18	28.44	28.79	
50	27.54	25.93	27.06	28.46	28.00	27.27	27.99	28.32	
75	—	24.57	25.63	27.92	—	25.49	26.77	27.52	
100	23.73	23.36	23.79	26.29	24.57	23.36	25.08	25.16	
150	20.73	19.24	19.83	20.36	21.12	19.18	20.66	19.76	
200	15.75	16.12	15.98	17.28	18.92	16.10	16.87	16.04	
Salinity (‰)									
0	33.380	34.155	34.269	34.006	34.286	34.661	34.063	34.012	
25	33.840	34.559	34.307	34.092	34.430	34.695	34.125	34.099	
50	34.105	34.559	34.387	34.128	34.524	34.762	34.190	34.143	
75	—	34.627	34.484	34.168	—	34.785	34.361	34.200	
100	33.349	34.621	34.450	34.251	34.708	34.799	34.520	34.309	
150	34.606	34.638	34.584	34.352	34.755	34.794	34.730	34.523	
200	34.482	34.685	34.601	34.531	34.577	34.795	34.778	34.574	
Oxygen (ml/l)									
0	4.52	4.10	4.14	4.00	4.51	3.78	4.54	3.99	
25	4.36	3.61	4.03	3.95	4.30	3.60	4.47	3.86	
50	3.94	3.34	3.67	3.84	4.07	3.36	4.16	3.67	
75	—	3.14	3.23	3.66	—	3.06	3.61	3.43	
100	3.39	2.97	3.23	3.26	3.61	2.85	3.81	2.97	
150	2.54	2.68	2.71	2.59	3.19	2.58	2.98	2.56	
200	—	2.42	2.44	2.37	—	2.41	2.98	2.25	
Fosfat (µgatl)									
0	0.96	1.46	1.00	0.85	1.01	0.62	0.89	0.69	
25	1.03	1.53	0.90	0.78	1.30	1.24	0.90	0.85	
50	1.25	1.66	0.96	0.88	0.88	1.32	0.91	0.74	
75	—	1.62	1.09	0.85	—	1.42	1.01	0.91	
100	1.29	1.65	1.51	1.02	1.16	1.14	1.38	1.48	
150	1.70	2.37	1.63	1.15	1.41	1.20	1.82	2.00	
200	—	2.01	1.67	1.34	—	1.54	1.81	1.23	
Nitrat (µgatl)									
0	0.80	1.71	0.80	0.76	0.72	—	0.74	0.63	
25	0.98	3.85	1.67	0.69	1.72	2.33	1.81	2.06	
50	1.90	6.17	2.59	0.86	2.06	4.11	2.06	1.18	
75	—	9.95	3.84	2.19	—	8.41	3.26	2.11	
100	5.63	11.84	6.05	3.20	5.69	9.36	5.00	5.40	
150	9.18	16.11	8.86	6.46	7.96	16.29	8.49	9.75	
200	—	20.27	11.13	11.73	—	20.53	11.42	12.72	
Klorofil-a (µg/l)									
0	0.46	0.39	0.32	0.75	0.46	0.35	0.27	0.35	
25	0.51	0.66	0.58	1.44	0.50	0.43	0.55	0.5	
50	0.53	1.14	0.74	2.42	0.46	1.00	0.52	0.58	
75	—	0.63	0.48	2.60	—	—	0.40	0.39	
100	0.36	—	0.23	1.15	0.33	—	0.27	0.32	
100	203536	270588	1453798	604852	137710	579191	770569	604852	
200	1144	1151	1150	639	1377	892	1136	1080	

Keterangan: Data oseanografi ini selama Musim Peralihan I (Mei 1996), Musim Timur/Tenggara (*Upwelling* Periode Agustus 1996), Musim Peralihan II (November 1996), dan Musim Barat/Barat Daya (Januari 1997).

Sumber: Balitbang Sumber Daya Laut LIPI (1996–1997)

Parameter oseanografi pada Gambar 7.6 merupakan parameter musiman konsentrasi CHL-a, SST, dan SSS yang terdiri atas musim barat/utara (Desember-Januari-Februari, DJF; Gambar 7.6A, 7.6E, 7.6I), musim peralihan I (Maret-April-Mei, MAM; Gambar 7.6B, 7.6F, 7.6J), musim timur/selatan (Juni-Juli-Agustus, JJA; Gambar 7.6C, 7.6G, 7.6K) dan musim peralihan II (September-Oktober-November, SON; Gambar 7.6D, 7.6H, 7.6L). Parameter oseanografi musiman tersebut dapat dengan mudah memperlihatkan fenomena *upwelling* yang terjadi di perairan Indonesia.



Keterangan: A: Desember, B: Maret, C: Juni, D: September, E: Januari, F: April, G: Juli, H: Oktober, I: Februari, J: Mei, K: Agustus, dan L: November. Fenomena *Upwelling* terjadi selama musim Juni-Juli-Agustus (JJA) dan sisanya di musim peralihan II September-Oktober-November (SON).

Sumber: Giovanni NASA (2023)

Gambar 7.6 Pola Sebaran Parameter Oseanografi Rata-Rata CHL-A, *sea surface temperature* (SST), dan *sea surface salinity* (SSS) di Perairan Indonesia Tahun 2003–2022

Fenomena *upwelling* di perairan Indonesia terjadi di dua lokasi utama, yaitu Samudra Hindia di sepanjang pantai Sumatra (Pulau Enggano, barat Kepulauan Mentawai, Kepulauan Batu, Pulau Nias, dan Pulau Simeulue) dan selatan Pulau Jawa, Bali, Lombok, Nusa Tenggara Barat (NTB) dan Nusa Tenggara Timur (NTT), Pulau Alor, Pulau Sumba, Pulau Timor, Pulau Rote, Laut Sawu (Pulau Sawu) (Susanto et al., 2001; Swara et al., 2021; Tubalawony et al., 2012), Laut Banda dan Laut Seram (Wouthuyzen, 2002; Trisianto et al., 2021), serta di Laut Arafura, Kepulauan Aru, dan Laut Maluku. Fenomena *upwelling* lokal juga dapat terjadi di perairan seperti Selat Makassar, Teluk Tomini, Teluk Tolo, Teluk Bone, dan di sekitar Kepulauan Talaud (*Upwelling*, Arlindo dan pergerakan, 2018).

Ditinjau dari musim, *upwelling* di perairan Indonesia lebih sering terjadi pada musim timur/tenggara (Juni-Juli-Agustus) dengan indikator konsentrasi klorofil-a (CHL-a) berkisar dari 0,3 hingga 0,8 mg/m³ di sekitar perairan Laut Seram, Laut Banda, dan Laut Arafura (Kepulauan Aru), dan sebesar 0,4–1,0 mg/m³ di perairan Selatan Jawa-Bali-Lombok-NTB-NTT. Lokasi *upwelling* tampaknya terjadi juga di Selat Karimata dan di selatan Selat Makassar dengan kisaran konsentrasi CHL-a 0,3–0,5 mg/m³, sedangkan di perairan Indonesia lainnya konsentrasi CHL-a hanya berkisar <0,2 mg/m³ (Gambar 7.6C). Indikator SST rendah dengan kisaran 25,7–27,1°C terdapat di lokasi utama *upwelling*, selatan Jawa-Bali-Lombok-NTT-NTB dan Laut Banda-Laut Arafura, tetapi SST lebih tinggi di Selat Karimata dan selatan Selat Makassar dengan kisaran 28,5–29,2°C, sedangkan perairan di luar lokasi *upwelling* memiliki SST > 29,2°C (Gambar 7.6G). Indikator *upwelling* dengan parameter SSS tinggi terdeteksi di kedua lokasi utama *upwelling*, termasuk Selat Karimata dan Selat Makassar dengan SSS berkisar 34,2–34,4 PSU. Perairan lainnya, di luar perairan yang disebutkan, memiliki SSS relatif lebih rendah dengan kisaran 33,4–34,0 PSU (Gambar 7.6K). Sisa dari fenomena *upwelling* masih terasa berlanjut hingga musim peralihan II (September-Oktober-November, SON), tetapi dengan luas area yang lebih kecil dan parameter konsentrasi CHL-a lebih rendah (0,3–0,5 mg/m³), SST

lebih tinggi (26,4–29,2°C), dan SSS yang hampir sama dengan musim JJA (34,2–34,4 PSU) (Gambar 7.6D, 7.6H, dan 7.6L).

Pada musim barat/utara (DJF) dan peralihan I (MAM) konsentrasi CHL-a dan salinitas menunjukkan pola sebaran yang mirip. CHL-a terdeteksi rendah, berkisar 0–0,1 mg/m³ di perairan laut lepas (Samudra Hindia dan Pasifik), konsentrasinya sedikit meningkat di laut bagian dalam Indonesia (0,2–0,2 mg/m³), dan lebih tinggi di perairan pantai (0,2–0,5 mg/m³). Konsentrasi CHL-a sangat tinggi (1 mg/m³) yang terdeteksi di sepanjang pantai timur Pulau Sumatra, Selat Malaka, di sekeliling seluruh pantai di Pulau Kalimantan, dan di sepanjang pantai barat Papua (Teluk Bituni) bukan disebabkan oleh fenomena *upwelling*, melainkan banyaknya sungai-sungai berukuran besar yang membawa nutrien ke perairan pantai. Selain itu, limpahan nutrien juga disumbangkan oleh hutan mangrove yang lebat, terutama di pantai barat Papua termasuk Teluk Bintuni, sehingga kesuburan perairan sepanjang tahun sangat tinggi. Pola SST pada periode DJF dan MAM menunjukkan pola yang tidak mirip, yaitu berkisar dari 27,8°C hingga 31,3°C, pada periode DJF, dan 28,5°C hingga 32,0°C pada periode MAM, menyebar lebih luas di laut lepas Samudra Hindia, sebelah timur Pulau Sumatra.

Pada saat fenomena *upwelling* terjadi pengayaan unsur hara pada perairan laut yang diikuti dengan peningkatan kesuburan perairan dan produktifitas primer (Kemili & Putri, 2012), yang pada akhirnya memicu peningkatan kepadatan plankton dan organisme pelagis lainnya (Nontji, 1987; Rosdiana et al., 2017). Informasi serupa juga diperoleh lewat kajian *upwelling* di Laut Banda (Moore et al., 2003; Tadjuddah, 2016), Spermonde dan Selat Makassar (Nurdin et al., 2013; Utama et al., 2017), Selatan Jawa (Varela et al., 2016), Bali (Tito & Susilo, 2016), Sumbawa (Taufikurrahman & Hidayat, 2017), Teluk Bone dan Laut Flores (Kunarso et al., 2018), Laut Maluku (Atmadipoera et al., 2018), Papua utara (Satrioajie, 2016), dan barat Sumatra (Pratama et al., 2015). Namun, sampai saat ini, tidak semua lokasi *upwelling* di Indonesia diobservasi secara detail dan memiliki informasi yang lengkap. Meskipun demikian, beberapa

fenomena *upwelling* di Indonesia telah diketahui secara baik, terutama mekanisme, variabilitas, dan kaitannya dengan distribusi biota lain, seperti *upwelling* di Laut Banda (Rachman et al., 2020) dan perairan selatan Jawa (Atmadipoera et al., 2020; Susanto et al., 2001).

Hasil analisis data dari National Oceanic and Atmospheric Administration Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (NOAA OISST) tahun 1982–2017 menunjukkan kecenderungan SST di wilayah pesisir dan perairan Laut Banda memiliki perbedaan, tetapi secara umum kecenderungan SST di perairan Laut Banda memiliki nilai positif (*warming*) (Rachman et al., 2020). Sementara itu, *upwelling index* (UI) berdasarkan data angin juga memiliki kecenderungan menurun dari periode 1982–2017. Faktor eksternal dianggap dominan dalam memengaruhi kondisi oseanografi di perairan Laut Banda dan turut menyebabkan kecenderungan penurunan intensitas *upwelling* yang terjadi di Laut Banda. Suhu permukaan di Laut Banda cenderung meningkat pada saat puncak musim *upwelling* (Juni–September), sedangkan intensitas *upwelling* menunjukkan pola kecenderungan menurun yang dikonfirmasi oleh kecenderungan penurunan konsentrasi klorofil-a (Rachman et al., 2020).

Dari beberapa hasil kajian fenomena *upwelling* di perairan selatan Jawa, telah dapat dibuktikan bahwa *upwelling* sangat dipengaruhi oleh sistem angin monsun, khususnya angin monsun tenggara (Susanto et al., 2001). Intensitas *upwelling* dipengaruhi oleh beberapa faktor oseanografi fisika, seperti El Niño Southern Oscillation (ENSO), Indian Ocean Dipole Mode (IODM), dan La Niña (Atmadipoera et al., 2020; Kunarso et al., 2012; Susanto et al., 2001), serta arlindo (Kuswardani & Qiao, 2014).

E. Lokasi *Upwelling* sebagai Wilayah Penangkapan Ikan

Pengayaan unsur hara saat terjadinya *upwelling* mengakibatkan peningkatan kesuburan perairan yang selanjutnya mendukung kelimpahan serta pertumbuhan fitoplankton dan zooplankton. Oleh sebab itu, lokasi *upwelling* merupakan daerah yang ideal bagi ikan-

ikan yang berukuran kecil untuk memperoleh pakan, yang umumnya adalah zooplankton. Selanjutnya, kondisi ini memberikan daya tarik bagi ikan-ikan yang berukuran besar untuk bermigrasi ke lokasi *upwelling* dalam upaya mendapatkan pasokan makanan. Hubungan yang berkesinambungan ini membuat lokasi *upwelling* merupakan wilayah yang sangat ideal untuk menangkap ikan (Tahir, 2013).

Beberapa hasil studi di perairan Indonesia memperkuat hipotesis di atas, antara lain, yaitu studi mengenai ikan cakalang (*Katsuwonus pelamis*) di perairan Maluku yang menyatakan bahwa lokasi penangkapan ikan cakalang yang produktif sangat erat hubungannya dengan tingkat kesuburan perairan (Wouthuyzen, 2002) dan hal itu terjadi di saat terjadinya fenomena *upwelling* (Gambar 7.7). Hasil studi lain dari Selat Makassar mengungkapkan bahwa pada saat *upwelling* akan terbentuk *thermal front* secara konsisten mulai Juni sampai September dan fenomena ini dapat terdeteksi lewat citra satelit. Formasi *thermal front* memiliki hubungan yang positif dengan

Tabel 7.2 Nilai Estimasi Potensi Perikanan (Ton) dari enam WPPNRI yang Merupakan Wilayah *Upwelling*

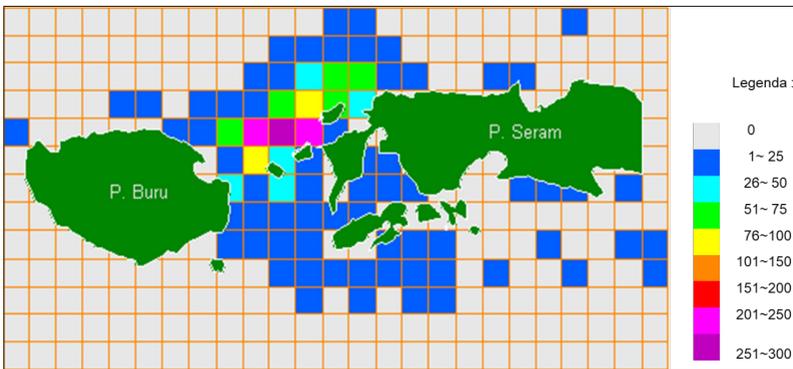
WPPNRI	Ikan Pelagis kecil	Ikan Pelagis Besar	Ikan Demersal	Ikan Karang	Udang Penaeid	Lobster	Kepiting	Rajungan	Cumi-Cumi
572	479.503	438.877	204.500	33.429	35.560	2.722	6.787	2.533	26.039
573	624.366	354.215	299.600	23.725	8.514	1.563	585	3.750	22.124
713	284.302	162.506	374.500	167.403	56.835	765	6.213	9.253	11.370
714	222.881	370.653	292.000	121.326	6.472	724	1.758	4.705	13.460
715	443.944	74.908	80.226	105.336	5.295	1.217	336	157	3.874
718	836.973	818.870	876.722	29.485	62.842	1.187	1.498	775	9.212

Keterangan:

1. WPPNRI 572: Perairan Samudra Hindia
2. WPPNRI 573: Perairan Samudra Hindia sebelah selatan Jawa hingga selatan Nusa Tenggara, Laut Sawu, dan Laut Timor bagian barat
3. WPPNRI 713: Perairan Selat Makassar, Teluk Bone, Laut Flores, dan Laut Bali
4. WPPNRI 714: Laut Banda dan Perairan Teluk Tolo
5. WPPNRI 715: Perairan Teluk Tomini, Laut Maluku, Laut Halmahera, Laut Seram, dan Teluk Berau
6. WPPNRI 718: Laut Arafura dan Timor bagian timur

Sumber: Komnaskajiskan (2022)

kelimpahan ikan cakalang di Selat Makassar (Zainuddin et al., 2020). Sementara itu, lokasi *upwelling* di Selat Makassar dan Laut Flores merupakan lokasi penangkapan ikan terbang yang produktif (Ali, 2013). Fakta lain yang diperoleh dari beberapa lokasi utama *upwelling* di dunia mengungkapkan bahwa lokasi-lokasi tersebut memiliki stok perikanan pelagis kecil yang potensial (Lasker, 1981; Mann & Lazier, 1996; Rykaczewski & Chekley Jr., 2008). Dari sebelas Wilayah Pengelolaan Perikanan Negara Republik Indonesia (WPPNRI), sedikitnya ada enam WPPNRI yang merupakan lokasi *upwelling* yang potensial dengan nilai potensi perikanan sebagai berikut (Tabel 7.2).



Keterangan: Legenda ialah *catch per unit effort* (CPUE), yaitu perhitungan antara hasil tangkapan dibagi dengan trip penangkapan suatu usaha penangkapan ikan.

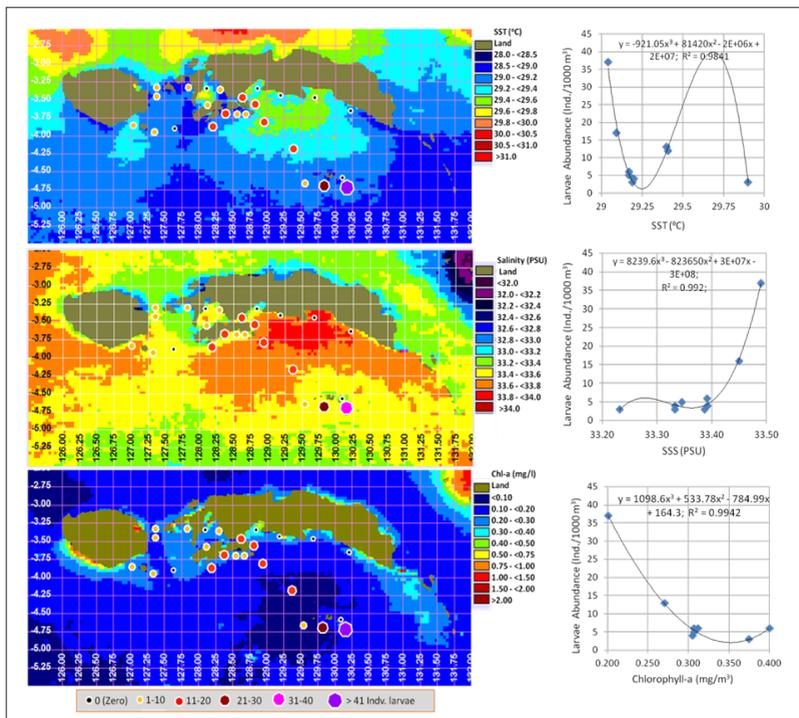
Sumber: Wouthuyzen (2002)

Gambar 7.7 Lokasi penangkapan ikan cakalang yang potensial dengan nilai CPUE yang selalu tinggi diperkirakan terkait dengan tingginya tingkat kesuburan perairan akibat *upwelling*.

F. Lokasi *Upwelling* sebagai Wilayah Pemijahan Ikan

Akibat dari hadirnya ikan-ikan dewasa di lokasi *upwelling* adalah nelayan biasanya mengindikasikan lokasi ini sebagai lokasi penangkapan ikan yang produktif. Namun, perlu disadari bahwa tidak

semua ikan dewasa yang datang ke lokasi *upwelling* mempunyai tujuan hanya untuk mencari makan, ada juga yang bermigrasi ke lokasi *upwelling* untuk melakukan pemijahan, seperti ikan terbang di Selat Makassar dan di selatan Jawa (Syahailatua et al., 2008). Hasil kajian tentang kemungkinan *upwelling* berkorelasi positif dengan pemijahan ikan juga diperoleh dari hasil penelitian di Laut Banda (Gambar 7.8). Dengan melakukan pemijahan di lokasi *upwelling* maka larva dan juvenil ikan akan berpeluang mendapat pasokan makanan yang memadai sehingga tingkat mortalitasnya menjadi lebih rendah.



Keterangan: (a) Suhu, (b) Salinitas, dan (c) Konsentrasi klorofil-a
Sumber: Hasil analisis Sam Wouthuyzen (2017, belum pernah diterbitkan)

Gambar 7.8 Plot Kelimpahan Larva Ikan Tuna terhadap Parameter Oseanografi yang Diperoleh dari Satelit Aqua MODIS

Tingkat mortalitas larva ikan laut telah diketahui mencapai 99% sebagai akibat dari kemampuan gerak yang sangat terbatas (Houde, 1987). Hal ini mengakibatkan larva ikan mudah dimangsa oleh predator yang ada di lingkungan perairan. Di samping itu, kemampuannya juga sangat terbatas untuk mendapatkan makanan alamiah pada saat persediaan kuning telur (*yolk sac*) terserap habis sehingga kondisi larva ikan sangat ditentukan oleh kondisi lingkungan di mana mereka berada. Apabila mereka berada di tempat yang berlimpah zooplankton, kondisinya akan baik, tetapi jika sebaliknya, kondisinya akan memburuk. Pengalaman menurunnya stok ikan pada perikanan *Pacific sardine* (*Sardinops sagax*) tahun 1940-an memberikan banyak inspirasi bagi para peneliti biologi perikanan untuk mengkaji lebih jauh aspek-aspek yang berhubungan dengan kehidupan ikan pada fase larva (Lasker, 1987). Oleh karena itu, pada fase ini kelangsungan hidup ikan untuk menjadi dewasa ditentukan. Jadi, kemampuan yang terbatas untuk menghindari dari predator dan mendapatkan makanan yang cukup mengakibatkan tingkat mortalitas larva atau juvenil ikan berpotensi selalu tinggi.

Banyak kajian telah dilakukan mengenai hubungan fenomena *upwelling* dengan mekanisme pemijahan dan rekrutmen ikan. Logika tentang hubungan bio-oseanografi ini sangat sederhana, yaitu peningkatan unsur hara memacu peningkatan konsentrasi fitoplankton dan zooplankton sebagai makanan larva dan juvenil ikan. Secara alamiah, kondisi ini memicu ikan-ikan dewasa untuk memijah atau bereproduksi karena pakan yang tersedia untuk larva ikan dan juvenilnya akan terpenuhi. Studi yang dilakukan di pantai timur Australia saat terjadi peristiwa *upwelling* menyimpulkan bahwa pertumbuhan larva ikan sangat berkorelasi dengan biomassa klorofil-a (Syahailatua et al., 2011). Artinya, makin tinggi tingkat klorofil-a, makin tinggi tingkat pertumbuhan dari larva ikan. Biasanya peningkatan densitas atau biomassa klorofil-a terjadi sebagai akibat adanya peningkatan konsentrasi unsur hara, terutama fosfat dan nitrat (Nontji, 1975; Sediadi, 2004). Dengan demikian, ketepatan waktu dan

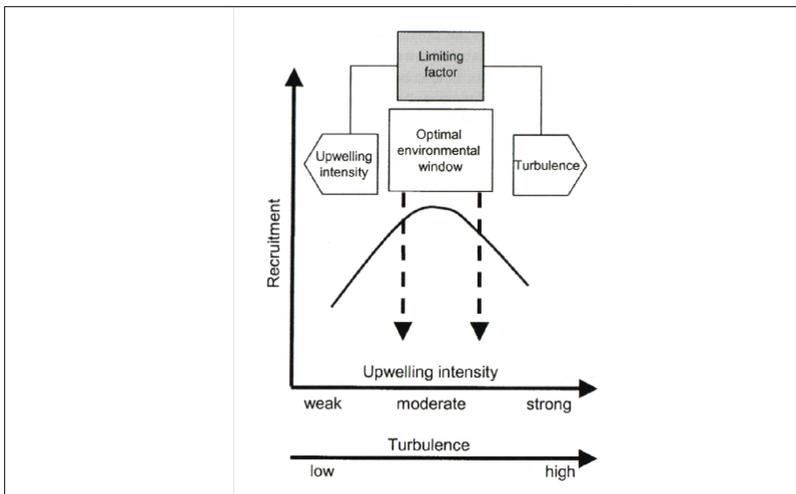
tempat pemijahan ikan akan sangat menentukan keberhasilan proses rekrutmen dari ikan. Oleh karena itu, lokasi *upwelling* merupakan salah satu area yang ideal untuk mendukung proses reproduksi dan rekrutmen tersebut (Cushing, 1975; Lasker, 1987).

Sedikitnya ada dua teori yang dapat menjelaskan proses rekrutmen pada ikan dalam kaitannya dengan lingkungan hidupnya. Pertama, hipotesis *match-mismatch* (Cushing, 1975, 1990) yang menjelaskan bahwa produksi tahunan dari larva ikan akan sangat tergantung dari ketepatan atau ketidaktepatan dalam ketersediaan makanan alamiah bagi larva ikan tersebut. Kedua, hipotesis *stability* (Lasker, 1987) yang menjelaskan bahwa periode kritis dalam daur hidup ikan adalah pada saat pertama kali larva memperoleh makanan. Kondisi yang stabil dari lingkungan sangat diperlukan pada saat itu karena turbulensi pada lapisan eufotik akan meningkatkan mortalitas larva ikan.

Dari berbagai kajian yang dilakukan di beberapa lokasi *upwelling* utama di dunia, dapat disimpulkan bahwa kedua teori di atas sangat mendukung kajian Cury dan Roy (2000), yaitu kesuksesan dalam proses rekrutmen ikan sangat berhubungan dengan faktor lingkungan. Mereka menyatakan bahwa proses *upwelling* sangat berpengaruh bagi rekrutmen ikan (Gambar 7.9). Jika kecepatan angin kurang dari 5–6 m/detik atau melebihi 6 m/detik, akan berdampak negatif bagi proses rekrutmen (Cury & Roy, 1989). Dalam hubungan ini, walaupun *upwelling* merupakan area yang potensial bagi pemijahan ikan dan rekrutmen, keberhasilan hidup larva masih sangat ditentukan oleh kondisi oseanografi lain, termasuk kecepatan angin.

Peranan *upwelling* juga tidak dapat dipisahkan dari distribusi dan kelimpahan sumber daya ikan. Dari beberapa hasil penelitian dapat diketahui bahwa puncak pemijahan beberapa jenis ikan yang bernilai ekonomi terjadi pada saat terjadinya *upwelling*. Ikan terbang (*Exocoetidae*) di Selat Makassar dan Laut Flores mengalami puncak pemijahan pada Juni–Juli (Ali, 2013). Hal ini bersamaan dengan kejadian *upwelling* di kedua perairan ini yang biasanya antara

Juni–September (Ilahude, 1970). Ikan tuna jenis *Thunnus maccoyii* mengalami puncak pemijahan di perairan selatan Jawa dan Australia bagian barat pada Oktober–Maret (Shingu, 1981) dan fenomena *upwelling* di selatan Jawa terjadi pada Juni–Oktober (Susanto et al., 2001; Wyrтки, 1961). Sementara itu, lemuru di Selat Bali mengalami musim pemijahan antara Mei dan September dengan puncak pemijahan pada Juli (Merta, 1992). Untuk Laut Banda, *upwelling* terjadi pada Juni–Agustus dan ikan-ikan pelagis kecil yang mengalami puncak pemijahan pada periode tersebut adalah teri (*Stolephorus bucanerii*, *S. heterolobus*, dan *S. devisi*), momar/layang (*Decapterus ruselli*), komu (*Auxis thazard*), dan selar (*Selar crumenophthalmus*) (Tabel 7.3).



Sumber: Cury dan Roy (1989)

Gambar 7.9 Hubungan antara Proses Rekrutmen Perikanan, Intensitas *Upwelling*, dan Turbulensi Perairan Laut

Tabel 7.3 Perkiraan Puncak Pemijahan Beberapa Jenis Ikan Pelagis Kecil di Teluk Ambon

Jenis Ikan	Bulan											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<i>Stolephorus bucanerii</i>							*	*	*	*		
<i>S. heterolobus</i>							*	*	*	*		
<i>S. devisi</i>							*	*	*	*		
<i>Decapterus ruselli</i>					*			*				*
<i>D. macrosoma</i>	*	*	*							*	*	*
<i>Auxis thazard</i>					*	*	*	*				
<i>Selar crumenophthalmus</i>						*						

Keterangan: * periode pemijahan

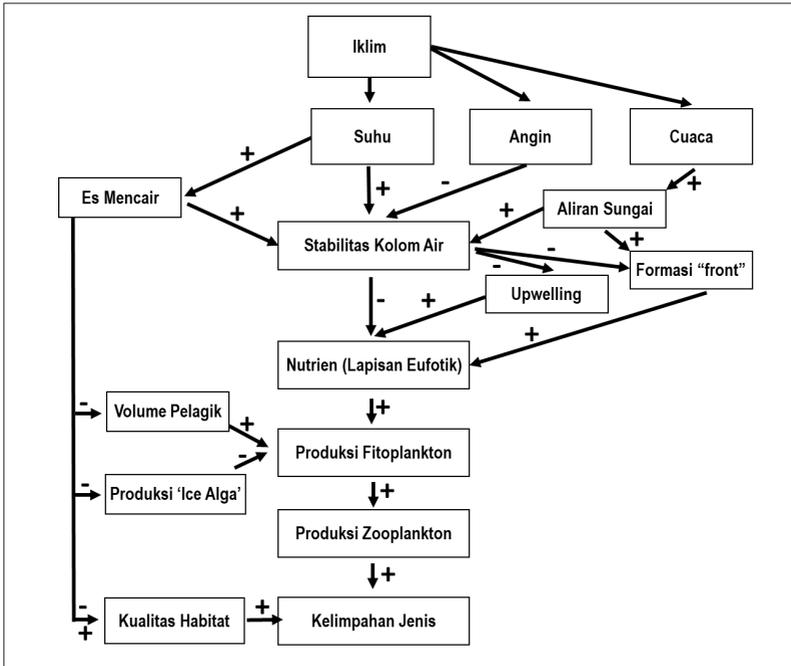
Sumber: Sumadhiharga (1991, 1992, 1994), Sumadhiharga dan Langkosono (1990), Sumadhiharga dan Hukum (1991)

Kecenderungan fenomena periode pemijahan ikan laut berkorelasi positif terhadap kejadian *upwelling* memberikan indikasi bahwa lokasi *upwelling* memiliki peranan penting dalam upaya konservasi sumber daya ikan di laut. Dari beberapa penjelasan terdahulu telah diinformasikan bahwa lokasi kejadian *upwelling* adalah wilayah perairan yang subur dan tingkat produksi primer yang tinggi. Kondisi ini memicu pertumbuhan yang cepat dari zooplankton yang merupakan pakan alami bagi ikan-ikan laut. Pakan alami bagi ikan laut yang tersedia di lokasi *upwelling* tidak hanya bagi ikan dewasa, tetapi juga bagi larva ikan dan juvenil. Apabila pemijahan ikan terjadi di lokasi *upwelling*, larva ikan diperkirakan akan mempunyai pasokan pakan alamiah yang memadai sehingga tingkat mortalitas larva ikan akan menjadi rendah (Houde, 1987). Dengan demikian, kesuksesan rekrutmen stok perikanan akan berpeluang tinggi.

G. Ancaman Pemanasan Global dan Perubahan Iklim

Fenomena *upwelling* dalam kaitannya dengan sumber daya ikan laut di Indonesia telah diulas sebelumnya. Namun, perlu juga diperhatikan

dampak dari pemanasan global dan perubahan iklim terhadap fenomena *upwelling*. Ilustrasi hal tersebut ditampilkan dalam skema berikut ini (Gambar 7.10).



Keterangan: Tanda + (positif) dan – (negatif) merujuk pada dampak dari perubahan. Kelimpahan jenis merujuk pada kelimpahan jenis biota laut, termasuk ikan. Sumber: Dimodifikasi dari Roessig et al. (2004)

Gambar 7.10 Diagram Pengaruh Perubahan Iklim terhadap Kehidupan Biota di Perairan

Naiknya suhu udara akan berdampak pada meningkatnya suhu air dan secara tidak langsung menambah volume air di Samudra yang berimplikasi pada makin tinggi paras laut (*sea level*). Dalam sepuluh tahun terakhir, paras laut meningkat setinggi 0,1–0,3 m, sedangkan model prediksi memperkirakan ada perubahan paras

laut antara 0,3–0,5 m dan kemungkinan menutupi area seluas 1 juta km² (Roessig et al., 2004). Jika hal ini berlangsung terus-menerus, hutan mangrove, estuari, dan daerah rawa yang terdapat di kawasan pesisir akan makin berkurang luasnya sehingga tingkat produktivitas perairan juga makin menurun. Pada akhirnya, kondisi tersebut akan sangat memengaruhi kehidupan biota laut yang berasosiasi dengan ekosistem laut dan pesisir.

Perubahan iklim dan naiknya paras laut akan turut memengaruhi formasi tekanan udara di atmosfer dan juga pola sirkulasi global air laut. Wilayah Indonesia yang berada di antara Samudra Hindia dan Samudra Pasifik diperkirakan akan mengalami peningkatan stratifikasi air laut akibat perubahan iklim. Selanjutnya, hal ini akan meningkatkan variabilitas kejadian beberapa fenomena iklim yang sangat ditentukan oleh interaksi lautan dan atmosfer, seperti ENSO, Indian Ocean Dipole (IOD), dan La Niña, serta kemungkinan variasi iklim menjadi lebih ekstrem (Chu et al., 2014; Roessig et al., 2004; Zheng et al., 2022).

ENSO atau juga dikenal dengan sebutan El Niño adalah kejadian di mana suhu udara di Samudra Pasifik, termasuk Indonesia, cenderung meningkat dan tingkat curah hujan yang lebih rendah dari kondisi normal. Kondisi iklim ini dapat memengaruhi ekosistem, pertanian, pasokan air tawar, dan menyebabkan angin topan dan peristiwa cuaca buruk lainnya di seluruh dunia. Di bawah pengaruh pemanasan global, rata-rata iklim kawasan Pasifik mungkin akan mengalami perubahan yang signifikan. Angin tropis timur pasat diperkirakan akan melemah; suhu permukaan lautan diperkirakan akan menghangat dengan cepat terutama di dekat Khatulistiwa. Lapisan termoklin di wilayah Khatulistiwa diperkirakan akan terbentuk yang ditandai dengan peralihan percampuran massa air dari permukaan laut dan lapisan bagian dalam Samudra. Gradien suhu melintasi lapisan termoklin menjadi lebih curam (Collins et al., 2010).

Pengaruh fenomena ENSO terhadap hasil tangkapan ikan laut juga bervariasi. Korelasi positif ditemukan dalam perikanan tuna di

Samudra Hindia (Kumar et al., 2014), perikanan cakalang di bagian tenggara Jawa (Handayani et al., 2019), dan untuk hasil tangkapan ikan todak di Samudra Hindia bagian timur (Setyadji & Amri, 2017). Sementara itu, dampak ENSO terhadap hasil tangkapan ikan tidak nampak secara signifikan di perairan sebelah barat Teluk Tomini (Suniada, 2020). Walaupun telah banyak kemajuan yang telah dicapai dalam kajian ENSO, variabilitas El Niño belum dapat diprediksi secara optimal, apakah aktivitasnya akan meningkat, menurun, atau frekuensi kejadiannya akan berubah (Cai et al., 2021; Collins et al., 2010).

Studi yang cukup komprehensif terkait perubahan iklim dan *upwelling* dilakukan pada sistem *upwelling* Humboldt (SUH), yang dianggap sebagai wilayah perairan paling produktif di antara *eastern boundary upwelling system* (EBUS) utama, yaitu California, barat laut Afrika, dan Benguela. Di samping itu, SUH juga merupakan wilayah produksi perikanan yang potensial dan produksinya jauh melebihi dibandingkan produksi perikanan di sistem *upwelling* lainnya (Chavez & Messie, 2009). Faktor angin adalah kekuatan pendorong utama dari terjadinya fenomena *upwelling* di wilayah pesisir yang sekaligus mengendalikan pasokan nutrisi dari kolom air yang lebih dalam ke lapisan eufotik di bagian permukaan laut. Variabilitas kekuatan, spasial, dan temporal kekuatan angin mengalami perubahan musiman dan antartahunan. Untuk memahami pengaruh angin, data tekanan angin dari *the advanced scatterometer* (ASCAT) selama sebelas tahun (2008–2018) dianalisis untuk menilai variasi *spatio-temporal* wilayah tekanan angin, *upwelling*, dan transpor Ekman di sepanjang pesisir Peru. Komponen tekanan angin dari utara ke selatan di lepas pantai Peru, yang merupakan faktor penggerak utama di lepas pantai, telah sedikit meningkat selama periode tersebut. Tahun-tahun saat kejadian El Niño menunjukkan tekanan angin yang sangat tinggi dan terkait dengan transport Ekman. Bagian selatan dari SUH lebih dipengaruhi oleh siklus ENSO daripada bagian utara. Selain itu, faktor musim turut berpengaruh pada tekanan angin. Selama musim panas di wilayah Peru (Desember–Februari) tekanan angin memiliki nilai minimum,

sedangkan tekanan angin tinggi terjadi pada Juli–September (Yari & Mohrholz, 2020).

Beberapa perubahan yang diproyeksikan dari studi di wilayah EBUS menunjukkan efek yang saling terkait antara intensitas *upwelling* dan suhu yang mungkin memiliki implikasi kompleks pada masa depan terhadap perubahan pasokan unsur hara dan perikanan di perairan EBUS. Misalnya, peningkatan stratifikasi terkait pemanasan permukaan dapat berpotensi menyebabkan pengurangan pasokan unsur hara lokal, sedangkan peningkatan intensitas *upwelling* dapat meningkatkan pasokan unsur hara (Chang et al., 2023). Pengaruh pada perairan yang jauh dari daerah tropis kemungkinan didorong oleh variasi dalam posisi sistem tekanan atmosfer atau efek berskala besar yang disebabkan oleh, misalnya, Osilasi Decadal Pasifik atau ENSO. Kejadian ini dapat menghasilkan perubahan unsur-unsur kimia perairan yang memengaruhi pasokan unsur hara ke perairan *upwelling*. Studi lanjutan perlu memasukkan riset biogeokimia laut dan komponen perikanan dalam kerangka model resolusi tinggi untuk menilai dampak perubahan *upwelling* di masa depan pada ekosistem laut dan perikanan (Chang et al., 2023). Dengan demikian, fenomena *upwelling* sebagai pemasok unsur hara sudah sangat terbukti dan dampak yang diberikan terhadap kesuburan perairan juga sangat nyata. Fenomena ini juga sekaligus mendukung pelestarian sumber daya ikan yang selanjutnya dapat memperkuat stok perikanan (Syahailatua, 2022).

Kajian tentang dampak pemanasan global dan perubahan iklim terhadap kehidupan biota laut dan perikanan belum banyak dilakukan di Indonesia, padahal laut Indonesia sangat rentan terhadap pengaruh iklim global tersebut. Di samping itu, wilayah Indonesia yang berada di daerah Khatulistiwa dan sebagai pusat segitiga terumbu karang dunia telah diketahui memiliki keanekaragaman hayati laut tertinggi di dunia. Namun, kelestarian di kawasan ini sangat dikhawatirkan terancam akibat dampak perubahan iklim (Miller et al., 2021).

Dari hasil studi ikan sidat di wilayah Segitiga Terumbu Karang Indonesia telah teridentifikasi 126–169 spesies larva sidat

(leptocephali). Jumlah ini merupakan keanekaragaman hayati sidat dan belut laut tertinggi di dunia, jika dibandingkan dengan koleksi leptocephali di Samudra Hindia, Pasifik, dan Atlantik, yaitu 29–107 spesies (Miller et al., 2016; Sugeha et al., 2008; Wouthuyzen et al., 2005). Sidat laut dari famili Anguillidae di wilayah Segitiga Terumbu Karang dapat dipengaruhi, terutama, oleh perubahan pola curah hujan terkait tahap pertumbuhannya di lingkungan air tawar dan menghambat pola migrasi mereka ke laut untuk memijah atau sebaliknya pada saat proses rekrutmen (Sugeha, 2003). Sementara itu, perubahan iklim dan pemanasan laut dapat memengaruhi kelangsungan hidup spesies belut laut yang menghuni berbagai habitat bentik dan pelagis (Miller et al., 2021). Efek pada belut laut akan bergantung pada jenis habitat tempat mereka tinggal, dengan dampak paling kecil terjadi pada spesies bentik atau pelagis dalam. Belut laut yang hidup di habitat dangkal akan paling terpengaruh jika pemanasan laut dan pemutihan karang mengurangi jenis spesies mangsa yang mereka andalkan (Miller et al., 2021). Berdasarkan kemungkinan hubungannya dengan habitat terumbu karang, belut dari famili Muraenidae dan Chlopsidae tampaknya merupakan jenis belut yang paling mungkin terkena dampak perubahan struktur komunitas akibat pemutihan karang. Semua spesies leptocephali hidup di lapisan permukaan laut tempat mereka memakan salju laut. Oleh karena itu, suhu laut yang lebih hangat dapat mengurangi jumlah atau kualitas salju laut yang tersedia mengakibatkan tingkat kelangsungan hidup larva lebih rendah. Studi lebih lanjut tentang keanekaragaman hayati sidat dan penggunaan habitat akan memberikan lebih banyak wawasan tentang kemungkinan hilangnya spesies endemik di Segitiga Terumbu Karang karena perubahan iklim, tetapi saat ini belum diketahui secara pasti berapa banyak spesies sidat dan belut laut yang kemungkinan terkena dampak langsung perubahan iklim (Miller et al., 2021).

Perubahan pola kejadian fenomena *upwelling* kemungkinan besar dapat terjadi dan tentu akan berdampak bagi keberadaan sumber daya ikan laut, terutama komposisi biodiversitas, penyebaran, dan kelimpahan. Seperti telah diketahui bahwa kejadian *upwelling* memiliki

intensitas (Cury & Roy, 1989) dan diharapkan intensitas yang baik pengaruhnya bagi rekrutmen sumber daya ikan adalah *upwelling* dengan intensitas yang moderat. Dengan kondisi ini, rekrutmen sumber daya ikan akan lebih optimal sehingga diharapkan stok ikan akan tetap tersedia secara berkelanjutan. Hal yang mengkhawatirkan ialah apabila *upwelling* terjadi dalam kondisi yang tidak ideal, yaitu dengan intensitas terlalu lemah atau terlalu kuat. Akibatnya, proses rekrutmen sumber daya ikan juga agak terganggu (Tiedemann et al., 2017). Hal ini dapat terjadi sebagai dampak dari adanya pemanasan global dan perubahan iklim. Jadi, pengamatan intensitas *upwelling* juga perlu dilakukan sehingga informasi tentang fenomena *upwelling* dan kontribusinya bagi konservasi sumber daya ikan dapat selalu dipantau.

H. Penutup

Ketersediaan stok perikanan yang melimpah di wilayah *upwelling* menjadikannya sebagai daerah penangkapan yang ideal, tetapi di sisi lain lokasi *upwelling* juga merupakan daerah pemijahan ikan yang potensial. Oleh karena itu, jika ingin melestarikan sumber daya ikan, menangkap ikan di daerah *upwelling* harus dipertimbangkan dengan bijaksana, mengingat kemungkinan besar akan menyebabkan terjadinya kegagalan rekrutmen ikan yang pada akhirnya menurunkan potensi stok perikanan.

Dua kepentingan ini, yaitu sebagai daerah penangkapan dan daerah pemijahan ikan, perlu mendapat perhatian yang khusus untuk pengelolaan sumber daya ikan laut. Informasi tentang *upwelling* di Indonesia masih sangat terbatas, terutama dalam kaitannya dengan proses rekrutmen ikan. Untuk itu, ada beberapa hal yang perlu menjadi perhatian, antara lain, sebagai berikut.

- 1) Kajian tentang fenomena *upwelling* perlu dilakukan untuk mengungkapkan proses *upwelling* itu sendiri, baik secara makro maupun mikro. Pemetaan lokasi *upwelling* yang akurat akan sangat membantu dalam melakukan observasi *in situ*, terutama

di musim *upwelling*. Penggunaan citra satelit dan *data series* akan dapat menentukan lokasi observasi yang tepat dan hal ini juga sekaligus meminimalkan biaya operasi kapal riset dalam melakukan observasi *upwelling* dan dampaknya bagi lingkungan laut dan perikanan.

- 2) Fenomena *upwelling* yang telah dipahami perlu dikembangkan lebih lanjut, terutama terkait dengan kajian aspek kimia laut, kehidupan plankton, dan biologi ikan. Di bidang kimia laut, perlu ditambahkan dengan pengamatan unsur besi dan unsur-unsur organik. Pada bidang kehidupan plankton, perlu dikaji spesies-spesies yang dominan dan perlu dipastikan, apakah planktonnya bersifat *autochthonous* (lokal) atau *allochthonous* (migrasi) dan apakah planktonnya ada di dalam sistem pencernaan ikan. Pada bidang biologi perikanan, perlu dipastikan jenis ikannya apakah dari kelompok pelagis besar, ataukah pelagis kecil. Dengan demikian, fenomena *upwelling* dalam kaitannya dengan pengelolaan sumber daya ikan bukan lagi merupakan teori, melainkan suatu kenyataan yang didukung oleh bukti-bukti ilmiah untuk menunjang pengelolaan sumber daya ikan secara baik dan benar dalam rangka ketahanan pangan nasional.
- 3) Keanekaragaman jenis ikan laut di perairan Indonesia mendorong penelitian yang tidak hanya fokus pada beberapa spesies tertentu, tetapi untukantisipasi pengembangan biota laut ke depan. Perlunya melakukan penelitian sumber daya ikan yang bersifat *multispecies*, baik untuk tujuan komersial maupun pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Penggunaan metodologi e-DNA diharapkan dapat memberikan informasi yang lebih baik dalam mengungkapkan informasi biodiversitas laut di Indonesia secara cepat dan akurat pada masa depan.
- 4) Keterlibatan berbagai bidang ilmu (*multidiscipline*) dalam penelitian sumber daya ikan laut sudah diketahui sejak lama, tetapi hal ini kurang diperhatikan dalam pelaksanaan penelitian. Faktor penyebabnya, antara lain, karena keterbatasan tenaga

ahli dalam bidang tertentu yang dapat dilibatkan dan sarana penelitian yang belum memadai. Keterlibatan berbagai disiplin ilmu dalam kajian proses *upwelling* terkait dengan sumber daya ikan laut akan sangat menarik karena ada beberapa proses yang sebenarnya secara tidak langsung memengaruhi keberadaan sumber daya ikan, misalnya keragaman jenis dan kelimpahan plankton.

- 5) Luasnya wilayah laut Indonesia dapat menjadi tantangan yang nyata dalam pelaksanaan riset dan pengumpulan data tentang sumber daya ikan sehingga diperlukan suatu pendekatan yang dapat melibatkan berbagai kepentingan (*multistakeholders*). Dengan adanya strategi ini maka berbagai institusi, seperti lembaga riset, universitas, lembaga swadaya masyarakat, industri perikanan atau pihak swasta lainnya dapat terlibat secara langsung. Keterlibatan berbagai pihak dalam satu kegiatan atau program riset akan dapat berdampak nyata dalam mengembangkan tingkat kepedulian perorangan atau institusi dalam pengelolaan atau pelestarian sumber daya ikan. Hal ini juga sekaligus akan mendorong tersedianya dana penelitian dari berbagai pihak sehingga pada akhirnya pekerjaan-pekerjaan riset terutama dengan pembiayaan yang tinggi, seperti penggunaan kapal riset, dapat dibiayai lewat berbagai sumber pendanaan (*multifunding resources*).
- 6) Kelestarian sumber daya perikanan sangat tergantung pada kondisi lingkungan sehingga perubahan habitat atau lingkungan hidup akan sangat berpengaruh pada keberadaan sumber daya perikanan. Perubahan kondisi lingkungan dapat terjadi secara alamiah atau akibat intervensi manusia. Dengan demikian, pengamatan kondisi sumber daya ikan umumnya dilakukan dalam suatu jangka waktu tertentu. Namun, pengamatan untuk waktu yang panjang (*multiyears*) dalam riset dapat mengungkapkan tendensi suatu perubahan secara lebih lengkap dan mengetahui faktor-faktor penyebab perubahan secara lebih jelas.

Ucapan Terima Kasih

Penulis bab ini mengucapkan terima kasih kepada para pimpinan di LIPI (sampai 2021) dan Pusat Riset Oseanografi BRIN yang telah memberikan dorongan dan kesempatan kepada penulis untuk melakukan kegiatan riset terkait bidang biologi oseanografi. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Prof. Iain Suthers (UNSW, Australia), Dr. Jeff Leis (UTAS, Australia), Dr. Tonny Miskiewicz (UNSW, Australia), dan Prof. Katsumi Tsukamoto serta tim sidat dari Atmospheric and Ocean Research Institute, University of Tokyo, Jepang yang telah memberikan bimbingan dan motivasi bagi penulis untuk menekuni riset-riset terkait oseanografi perikanan. Terima kasih juga disampaikan kepada semua teknisi penelitian di LIPI dan BRIN yang telah membantu penulis dalam melakukan riset sejak tahun 1981.

Referensi

- Ali, S. A. (2013). Degradasi stok, pengelolaan dan konservasi ikan terbang di Selat Makassar dan Laut Flores, Sulawesi Selatan. Dalam A. I. Burhanuddin, H. M. N. Nessa, & A. Niartiningih (Ed.), *Membangun sumber daya kelautan Indonesia: Gagasan dan pemikiran guru besar Universitas Hasanuddin*. IPB Press.
- Atmadipoera, A. S., Jasmine, A. S., Purba, M., & Kuswardani, A. R. T. D. (2020). *Upwelling* characteristics in the southern Java waters during strong La Nina 2010 and super El Nino 2015. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 12(1), 257–276. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v12i1.28977>
- Atmadipoera, A. S., Khairunnisa, Z., & Kusuma, D. W. (2018). *Upwelling* characteristics during El Nino 2015 in Maluku Sea. Dalam *IOP conf. ser.: Earth environ. sci.* (176, Artikel 012018). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/176/1/012018>
- Balitbang Sumber Daya Laut LIPI. (1996–1997). [Data oseanografi yang tidak diterbitkan terkait hasil survei klasik fenomena upwelling pada pelayaran K/R Rd Soerjaatmadja di Laut Banda

dan Laut Seram selama musim peralihan I (Mei 1996), musim timur/tenggara (upwelling periode Agustus 1996), musim peralihan II (November 1996), dan musim barat/barat daya (Januari 1997)].

- Barnes, R. S. K., & Hughes, R. N. (1988). *An introduction to Marine Ecology*. Blackwell Scientific Publications.
- Cai, W., Santoso, A., Collins, M., Dewitte, B., Karamperidou, C., Kug, J., Lengaigne, M., McPhaden, M. J., Stuecker, M. F., Taschetto, A. S., Timmermann, A., Wu, L., Yeh, S., Wang, G., Ng, B., Jia, F., Yang, Y., Ying, J., Zheng, X., ... Zhong, W. (2021). Changing El Niño–Southern Oscillation in a warming climate. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2(9), 628–644. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00199-z>
- Chang, P., Xu, G., Kurian, J., Small, R. J., Danabasoglu, G., Yeager, S., Castruccio, F., Zhang, Q., Rosenbloom, N., & Chapman, P. (2023). Uncertain future of sustainable fisheries environment in eastern boundary *upwelling* zones under climate change. *Communications Earth & Environment*, 4(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00681-0>
- Chavez, F. P., & Messié, M. (2009). A comparison of eastern boundary *upwelling* ecosystems. *Progress in Oceanography*, 83(1–4), 80–96. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.032>
- Chavez, F. P., & Smith, S. L. (1994). Biological and chemical consequences of open ocean *upwelling*. Dalam C. P. Summerhayes, K.-C. Emeis, M. V. Angel, R. L. Smith, & B. Zeitzschel (Ed.), *Upwelling in the ocean: modern processes and ancient records* (149–170). John Wiley and Sons.
- Chu, J., Ha, K., Lee, J., Wang, B., Kim, B., & Chung, C. E. (2014). Future change of the Indian Ocean basin-wide and dipole modes in the CMIP5. *Clim Dynamics*, 43(1–2), 535–551. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-013-2002-7>
- Collins M., An, S., Cai, W., Ganachaud, A., Guilyardi, E., Jin, F., Jochum, M., Lengaigne, M., Power, S., Timmermann, A., Vecchi, G., & Wittenberg, A. T. (2010). The impact of global warming on

- the tropical Pacific Ocean and El Niño. *Nature Geoscience*, 3(6), 391–397. <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo868>
- Cury, P., & Roy, C. (1989). Optimal environmental window and pelagic fish recruitment success in *upwelling* areas. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 46(4), 670–680. <http://dx.doi.org/10.1139/f89-086>
- Cury, P., Bakun, A., Crawford, R. J. M., Jarre, A., Quinones, R. A., Shannon, L. J., & Verheye, H. M. (2000). Small pelagics in *upwelling* systems: patterns of interaction and structural changes in “wasp-waist” ecosystems. *ICES Journal of Marine Science*, 57(3) 603–618. <https://doi.org/10.1006/jmsc.2000.0712>
- Cushing, D. H. (1975). *Marine ecology and fisheries*. Cambridge University Press.
- Cushing, D. H. (1990). Plankton production and year-class strength in fish populations: An update of the match/mismatch hypothesis. *Advances in Marine Biology*, 26, 250–293. [https://doi.org/10.1016/S0065-2881\(08\)60202-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2881(08)60202-3)
- Era, W., Mbay, L. O. N., Kusuma, D. W., & Trenggono, M. (2012). Analisis suhu, salinitas, dan oksigen terlarut sebagai indikator *upwelling* di timur laut Samudra India. *Jurnal Kelautan Nasional*, 7(3), 175–182.
- FAO. (2014). *The state of world fisheries and aquaculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/i3720e/i3720e.pdf>
- Firdaus, M., Fauzi, A., & Falatehan A. F. (2018). Deplesi sumber daya ikan tuna dan cakalang di Indonesia. *Jurnal Sosial Ekonomi Kelautan dan Perikanan*, 13(2), 167–178. <http://dx.doi.org/10.15578/jsekp.v13i2.6906>
- Froese, R., & Pauly, D. (Ed). (2022, Juli). FishBase: The global encyclopedia about fish. *Fishbase.org*. Diakses pada Juli, 2022, dari <https://fishbase.mnhn.fr/search.php>
- Giovanni NASA. (2023, Juni). *Giovanni: The bridge between data and science*. <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/>.

- Gordon, A. L. (2005). Oceanography of the Indonesian Seas and their throughflow. *Oceanography*, 18(4), 15–27. <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2005.01>
- Gordon, A. L., & Fine., R. A. (1996). Pathways of water between the Pacific and Indian Oceans in the Indonesian Seas. *Nature*, 379, 146–149. <https://doi.org/10.1038/379146a0>
- Gordon, A. L., Susanto, R.D., & Ffield, A. (1999). Throughflow within Makassar Strait. *Geophys. Res. Lett.*, 26(1), 3325–3328. <https://doi.org/10.1029/1999GL002340>
- Gordon, A. L., Susanto, R.D., Ffield, A., Huber, B. A., Pranowo, W., & Wirasantosa, S. (2008). Makassar Strait throughflow, 2004 to 2006. *Geophys. Res. Lett.*, 35(24), Artikel L24605. <https://doi.org/10.1029/2008GL036372>
- Gordon, A. L., Susanto, R. D., & Vranes, K. (2003). Cool Indonesian throughflow as a consequence of restricted surface layer flow. *Nature*, 425, 824–828.
- Hallegraeff, G. M., & Jeffrey, S. W. (1993). Annually recurrent diatom blooms in spring along the New South Wales coast of Australia. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, 44(2), 325–334. <https://doi.org/10.1071/MF9930325>
- Handayani, C., Soepardjo, A. H., & Aldrian, E. (2018). Impact of an El-Nino Southern Oscillation (ENSO) to fluctuation of skipjack catch production in southern east Java. *Journal of Physics: Conference Series*, 1217, Artikel 012170. <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1217/1/012170>
- Houde, E. D. (1987). Fish early life dynamics and recruitment variability. *American Fisheries Society Symposium*, 2, 17–29.
- Hutchings, L., Pitcher, G. C., Probyn, T. A., & Bailey, G. W. (1994). The chemical and biological consequences of coastal *upwelling*. Dalam C. P. Summerhayes, K.-C. Emeis, M. V. Angel, R. L. Smith, & B. Zeitzschel (Ed.), *Upwelling in the ocean: Modern processes and ancient records* (65–82). John Wiley and Sons.

- Ilahude, A. G. (1970). On the occurrence of *upwelling* in the southern Makassar Strait. *Marine Research in Indonesia*, 10, 3–53. <http://dx.doi.org/10.14203/mri.v10i0.335>
- Ilahude, A. G. (1978). On the factors affecting the productivity of the southern Makassar Strait. *Marine Research in Indonesia*, 21, 81–107. <http://dx.doi.org/10.14203/mri.v21i0.391>
- Kasim, K., Widodo, A., & Prasetyo, A. P. (2011). Pengaruh periode La Nina dan El Nino terhadap produksi beberapa pelagis kecil yang didaratkan di pantai utara Jawa. *Jurnal Lit. Perikan. Ind.*, 17(4), 257–264. <http://dx.doi.org/10.15578/jppi.17.4.2011.257-264>
- Kementerian PPN. (2013). *Background study rencana pembangunan jangka menengah nasional 2015-2019 bidang kelautan dan perikanan*. Direktorat Kelautan dan Perikanan, Badan Perencanaan Pembangunan Nasional.
- Kemili, P., & Putri, M. R. (2012). Pengaruh durasi dan intensitas *upwelling* berdasarkan anomali suhu permukaan laut terhadap variabilitas produktivitas primer di perairan Indonesia. *J. Ilmu dan Teknologi Kelautan*, 4(1), 66–79. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v4i1.7807>
- Keputusan Menteri Kelautan dan Perikanan Nomor 19 Tahun 2022 tentang Estimasi Potensi Sumber Daya Ikan, Jumlah Tangkapan Ikan yang Diperbolehkan, dan Tingkat Pemanfaatan Sumber Daya Ikan di Wilayah Pengelolaan Perikanan Negara Republik Indonesia. (2022). <https://kkp.go.id/an-component/media/upload-gambar-pendukung/DitJaskel/peraturan/Kepmen%20KP%20Nomor%2019%20Tahun%202022%20tentang%20Estimasi%20Potensi%20JT%20dan%20Tingkat%20Pemanfaatan%20SDI%20di%20WPPNRI.pdf>
- Komisi Nasional Pengkajian Sumber Daya Ikan (Komnaskajiskan). (2022). *Estimasi potensi, jumlah tangkapan yang diperbolehkan (JT), Tingkat pemanfaatan (tp dan indikator kesehatan stok ikan di WPP-NRI*. Kementerian Kelautan dan Perikanan.
- Kiara. (2014, 20 Juni). *Daya saing perikanan menurun*. <http://www.kiara.or.id/2014/06/20/daya-saing-perikanan-menurun/>

- Kumar, P. S., Pillai, G. N., & Manjusha, U. (2014). El Nino Southern Oscillation (ENSO) impact on tuna fisheries in Indian Ocean. *SpringerPlus*, 3(591), 1–13. <https://doi.org/10.1186%2F2193-1801-3-591>
- Kunarso, Ismanto, A., Situmorang, P., & Wulandari, Y. S. (2018). Variability of *upwelling* in Bone Bay and Flores Sea. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(10), 742–751. <http://iaeme.com/Home/issue/IJCIET?Volume=9&Issue=10>
- Kunarso, K., Hadi, S., Ningsih, N. S., & Baskoro, M. S. (2012). Variabilitas suhu dan klorofil-a di daerah *upwelling* pada variasi kejadian ENSO dan IOD di perairan selatan Jawa sampai Timor. *Ilmu Kelautan: Indonesian J. of Marine Sciences*, 16(3), 171–180. <https://doi.org/10.14710/ik.ijms.16.3.171-180>
- Kuswardani, R. T. D., & Qiao, F. (2014). Influence of the Indonesian throughflow on the *upwelling* off the east coast of South Java. *Chinese Science Bulletin*, 59(33), 4516–4523. <https://doi.org/10.1007/s11434-014-0549-2>
- Largier, J. L. (2020). *Upwelling* bays: How coastal *upwelling* controls circulation, habitat, and productivity in bays. *Annual Review of Marine Science*, 12, 415–447. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010419-011020>
- Lasker, R. (Ed.). (1981). *Marine fish larvae: Morphology, ecology, and relation to fisheries*. University of Washington Press. <https://swfsc-publications.fisheries.noaa.gov/publications/CR/1981/1981XD.pdf>
- Lasker, R. (1987). Use of fish eggs and larvae in probing some major problems in fisheries and aquaculture. *American Fisheries Society Symposium*, 2, 17–29.
- Mann, K. H., & Lazier, J. R. N. (1996). *Dynamics of marine ecosystems: Biological-physical interactions in the oceans*. Blackwell Science, Inc.
- Merta, I. G. S. (1992). Beberapa parameter biologi ikan lemuru, *Sardinella lemuru* (Bleeker 1853) dari perairan Selat Bali. *Jurnal Penelitian Perikanan Laut*, 67, 1–10.

- Miller, M. J., Wouthuyzen, S., Aoyama, J., Sugeha, H. Y., Watanabe, S., Kuroki, M., Syahailatua, A., Suharti, S., Hagihara, S., Tantu, F. Y., Trianto, Otake, T., & Tsukamoto, K. (2021). Will the high biodiversity of eels in the Coral Triangle be affected by climate change? Dalam *IOP conf. ser.: Earth environ. sci.* (789, 1, Artikel 012011). <https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/789/1/012011>
- Miller, M. J., Wouthuyzen, S., Sugeha, H. Y., Kuroki, M., Tawa, A., Watanabe, S., Syahailatua, A., Suharti, S., Tantu, F. Y., Otake, T., & Tsukamoto, K., & Aoyama, J. (2016). High biodiversity of leptocephali in Tomini Bay Indonesia in the center of the Coral Triangle. *Regional Studies Marine Science*, 8(1), 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2016.09.006>
- Moore, T. S., Marra, J., & Alkatiri, A. (2003). Response of the Banda Sea to the southeast monsoon. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 261, 41–49. <http://dx.doi.org/10.3354/meps261041>
- National Oceanographic. (2017, 13 November). *Upwelling dan kaitannya dengan fenomena di laut*. <https://www.national-oceanographic.com/img/3cc3aa61065684c71775630095544016867876ac.gif>
- Nontji, A. (1975). Distribution of chlorophyll-a in the Banda Sea by the end of *upwelling* season. *Marine Research in Indonesia*, 14(1), 49–59.
- Nontji, A. (1987). *Laut Nusantara*. Penerbit Djambatan
- Nurdin, S., Mustapha, M. A., & Lihan, T. (2013). The relationship between sea surface temperature and chlorophyll-a concentration in fisheries aggregation area in the archipelagic waters of spermonde using satellite images. *AIP Conference Proceedings*, 1571(1), 466–472. <https://doi.org/10.1063/1.4858699>
- Pratama, G. A., Pranowo, W. S., Sunarto, & Purba, N. P. (2015). Keterkaitan kondisi parameter fisika dan kimia perairan dengan distribusi klorofil-a di perairan Barat Sumatera. *Omni Akuatika*, 16, 33–43. <https://pustaka.unpad.ac.id/archives/150631>
- Rachman H. A., Gaol, J. L., Syamsudin, F., & As-syakur, A. (2020). Influence of coastal *upwelling* on sea surface temperature trends

- Banda Sea. Dalam *IOP conf. series: Earth and environmental science* (429, Artikel 012015). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/429/1/012015>
- Rochford, D. J. (1962). Hydrology of the Indian Ocean. II. The surface waters of the southeast Indian Ocean and Arafura Sea in the spring and summer. *Australian Journal for Marine and Freshwaters*, 13(3), 226–251. <https://doi.org/10.1071/MF9620226>
- Roessig, J. M., Woodley, C. M., Cech, J. J., & Hansen, L.J. (2004). Effects of global climate change on marine and estuarine fishes and fisheries. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 14(2), 251–275. <http://dx.doi.org/10.1007/s11160-004-6749-0>
- Rosdiana, A., Prariono, T., Atmadipoera, A. S., & Zuraida, R. (2017). Nutrient and chlorophyll - A distribution in Makassar *upwelling* region: From MAJAFLOX cruise 2015. Dalam *IOP conference series: Earth and environmental science* (54, Artikel 012087). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/54/1/012087>
- Rykaczewski, R. R., & Checkley Jr., D. M. (2008). Influence of ocean winds on the pelagic ecosystem in *upwelling* regions. *PNAS*, 105(6), 1965–1970. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0711777105.
- Satrioajie, W. N. (2016). Detection of *upwelling* using modis image and triton buoy in the North Papua Waters. *Jurnal Segara*, 10(2), 129–136. <https://doi.org/10.15578/segara.v10i2.22>
- Sediadi, A. (2004). Efek *upwelling* terhadap kelimpahan dan distribusi fitoplankton di perairan Laut Banda dan sekitarnya. *Makara Sains*, 8(2), 43–51. <http://dx.doi.org/10.7454/mss.v8i2.409>
- Setyadji, B., & Amri, K. (2017). The effect of climate anomaly (ENSO and IOD) on the distribution of swordfish (*Xiphias gladius*) in the eastern Indian Ocean. *Jurnal Segara*, 13(1), 49–63. <http://dx.doi.org/10.15578/segara.v13i1.6422>
- Shingu, C. (1981). *Ecology and stock of southern bluefin tuna*. Australian CSIRO Division Fishery and Oceanography.
- Steidinger, K. A., & Walker, L. M. (1984). *Marine plankton life cycle strategies*. CRC Press.

- Sugeha, H. Y. (2003). *Life history of tropical eel Anguilla marmorata in the Indonesian waters* [Disertasi tidak diterbitkan]. University of Tokyo.
- Sugeha, H. Y., Suharti, S. R., Wouthuyzen, S., & Sumadhiharga, K. (2008). Biodiversity, distribution, and abundance of the tropical anguillid eels in the Indonesian waters. *Marine Research in Indonesia*, 33(2), 129–137. <https://doi.org/10.14203/mri.v33i2.486>
- Sumadhiharga, K. (1991). Struktur populasi dan reproduksi ikan momar merah (*Decapterus russelli*) di Teluk Ambon. Dalam D. P. Praseno, W. S. Atmadja, & O. H. Arinardi (Ed.), *Perairan Maluku dan sekitarnya* (39–48). Balitbang Sumber Daya Laut, P3O-LIPI.
- Sumadhiharga, K. (1992). *Anchovy fisheries and ecology with special reference to the reproductive biology of Stolephorus spp. in Ambon Bay, Indonesia* [Tesis tidak diterbitkan]. University of Tokyo.
- Sumadhiharga, K. (1994). Reproduksi dan makanan ikan momar putih (*Decapterus macrosoma*) di Teluk Ambon. Dalam *Perairan Maluku dan sekitarnya* (6, 27–40).
- Sumadhiharga, K., & Hukom, F. D. (1991). Penelitian beberapa aspek biologi ikan kawalnya (*Selar crumenophthalmus*) di perairan Pulau Ambon dan sekitarnya. Dalam D. P. Praseno, W. S. Atmadja, & O. H. Arinardi (Ed.), *Perairan Maluku dan sekitarnya* (31–38). Balitbang Sumber Daya Laut, P3O-LIPI.
- Sumadhiharga, K., & Langkosono. (1990). Beberapa aspek biologi ikan komu (*Auxis thazard*) di perairan Pulau Ambon. Dalam D. P. Praseno, W. S. Atmadja, & O. H. Arinardi (Ed.), *Perairan Maluku dan sekitarnya* (28–26). Balitbang Sumber Daya Laut, P3O-LIPI.
- Suman, A., Irianto, H. E., Satria, F., & Amri, K. (2016). Potensi dan tingkat pemanfaatan sumber daya ikan di wilayah pengelolaan perikanan negara Republik Indonesia (WPP NRI) tahun 2015 serta opsi pengelolaannya. *Jurnal Kebijakan Perikanan Indonesia*, 8(2), 97–110. <http://dx.doi.org/10.15578/jkpi.8.2.2016.97-100>
- Suniada, K. I. (2020). Variability of sea surface temperature in fishery management area 715, Indonesia and its relation to the monsoon, ENSO and fishery production. *International Journal of*

- Remote Sensing and Earth Sciences*, 17(2), 99–114. <http://dx.doi.org/10.30536/j.ijreses.2020.v17.a3370>
- Susanto, R. D., Gordon, A. L., & Zheng, Q. (2001). *Upwelling along the coasts of Java and Sumatra and its relation to ENSO. Geophysical Research Letters*, 28(8), 1599–1602. <https://doi.org/10.1029/2000GL011844>
- Sverdrup, H. U., Johnson, M. W., & Fleming, R. H. (1970). *The oceans: Their physic, chemistry, and general biology*. Prentice-Hall, Inc.
- Swara, I. G. M. A., Karang, I. W. G. A., & Indrawana G. S. (2021). Analisis pola sebaran area *upwelling* di selatan Indonesia menggunakan citra MODIS Level-2. *Journal of Marine Research and Technology*. 4(1), 56–71. <https://doi.org/10.24843/JMRT.2021.v04.i01.p09>
- Syahailatua, A. (2022). *Manfaat riset iktioplankton dalam mendukung pengelolaan sumber daya ikan di Indonesia*. Penerbit BRIN. <https://penerbit.brin.go.id/press/catalog/view/715/467/12250>
- Syahailatua, A., Ali, S. A., & Makatipu, P. (2008). Strategi reproduksi ikan terbang (Exocoetidae) dan kaitannya dengan faktor oseanografi di perairan Indonesia. *Jurnal Penelitian Perikanan Indonesia*, 14(3), 303–310. <http://dx.doi.org/10.15578/jppi.14.3.2008.303-311>
- Syahailatua, A., Taylor, M. D., & Suthers, I. M. (2011). Growth variability and stable isotope composition of two larval carangid fishes in the East Australian Current: The role of *upwelling* in the separation zone. *Deep Sea Research II*, 58(5), 691–698. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2010.06.009>
- Tadjuddah, M. (2016). Observations of sea surface temperature on spatial and temporal using aqua MODIS satellite in west Banda Sea. *Procedia Environ. Sci.*, 33, 568–573. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.109>
- Tahir, M. (2013). Peranan oseanografi dalam pemanfaatan sumber daya perikanan berkelanjutan. Dalam A. I. Burhanuddin, H. M. N. Nessa, & A. Niartiningsih (Ed), *Membangun sumber daya*

kelautan Indonesia: Gagasan dan pemikiran guru besar Universitas Hassanuddin. IPB Press.

- Taufikurahman, Q., & Hidayat R. (2017). Coastal *upwelling* in southern coast of Sumbawa Island, Indonesia. Dalam *IOP conf. series: Earth and environmental science* (54, Artikel 012075). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/54/1/012075>
- Tiedemann, M., Fock, H. O., Brehmer, P., Doring, J., & Mollmann, C. (2017). Does *upwelling* intensity determine larval fish habitats in *upwelling* ecosystems? The case of Senegal and Mauritania. *Fisheries Oceanography*, 26(6), 665–667. <https://doi.org/10.1111/fog.12224>
- Tito, C. K., & Susilo, E. (2016). The correlation of *upwelling* phenomena and ocean sunfish occurrences in Nusa Penida, Bali. Dalam *IOP conf. series: Earth and environmental science* (55, Artikel 012031). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/55/1/012031>
- Trisianto, G., Wulandari, S. Y., Suryoputro, A. A. D., Handoyo G., & Zainuri, M. (2021). Studi variabilitas *upwelling* di Laut Banda. *Indonesian Journal of Oceanography*, 3(1), 25–35. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v3i1.9764>
- Tubalawony, S., Kusmanto, E., & Muhajirin. (2012). Suhu dan salinitas permukaan merupakan indikator *upwelling* sebagai respon terhadap angin muson tenggara di perairan bagian utara Laut Sawu. *Ilmu Kelautan*, 17(4), 226–239. <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/ijms/article/view/5137>
- Upwelling*, Arlindo dan pergerakan ikan tuna di Indonesia. (2018, 3 Agustus). *Darilaut*. <https://darilaut.id/berita/laporan-khusus/upwelling-arlindo-dan-pergerakan-ikan-tuna-di-indonesia>
- Utama, F. G., Atmadipoera, A. S., Purba, M., Sudjono, E. H., & Zuraida, R. (2017). Analysis of *upwelling* event in Southern Makassar Strait. Dalam *IOP conf. ser.: Earth environ. sci.* (54, Artikel 012085). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/54/1/012085>
- Varela, R., Santos, F., Gómez-Gesteira, M., Álvarez, I., Costoya, X., & Días, J. M. (2016). Influence of coastal *upwelling* on SST Trends

- along the south coast of Java. *PLoS One*, 11(9), Artikel e01621222. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162122>
- Wirasatriya, A., Susanto, R. D., Kunarso, Jalil, A. R., Ramdani, F. & Puryajati, A. D. (2021). Northwest monsoon *upwelling* within the Indonesian seas. *International Journal of Remote Sensing*, 42(14), 5433–5454. <https://doi.org/10.1080/01431161.2021.1918790>
- Wouthuyzen, S., Miller, M. J., Aoyama, J., Minagawa, G., Sugeha, H. Y., Suharti, S. R., Inagaki, T., & Tsukamoto, K. (2005). Biodiversity of anguilliform leptocephali in central Indonesian Seas. *Bulletin of Marine Science*, 77(2), 209–223. <https://www.ingentaconnect.com/content/umrsmas/bullmar/2005/00000077/00000002/art00005?crawler=true>
- Wouthuyzen, S. (2002). Studi umbalan (*upwelling*) di perairan Laut Seram dan Laut Banda. *Oseanologi dan Limnologi di Indonesia*, 34, 17–35.
- Wouthuyzen, S., Kusmanto, E., Fadli, M., Harsono, G., Salamena, G., Lekalette, J. & Syahailatua, A. (2020). Ocean color as a proxy to predict sea surface salinity in the Banda Sea. Dalam *IOP conf. series: Earth and environmental science* (618, Artikel 012037). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/618/1/012037>
- Wyrтки, K. (1958). The water exchange between the Pacific and the Indian Oceans in relation to *upwelling* processes. *Proc. Ninth Pac. Sci. Cong.*, 16, 61–65.
- Wyrтки, K. (1961). *Physical oceanography of the Southeast Asian waters*. The University of California, Scripps Institution of Oceanography. <https://escholarship.org/uc/item/49n9x3t4>
- Yari, S., & Mohrholz, V. (2020, 4–8 May). *Seasonal to interannual variations of wind forcing in the Peruvian upwelling system* [Abstrak]. EGU General Assembly 2020, Online, EGU2020-22388. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-22388>
- Zainuddin, M., Mallawa, A., Safruddin, Farhum, S. A., Hidayat, R., Putri, A. R. S., & Ridwan, M. (2020). Spatio-temporal thermal fronts distribution during January-December 2018 in Makassar

Strait: An important implication for pelagic fishery. *Jurnal Ilmu Kelautan SPERMONDE*, 6(1), 11–15. <http://dx.doi.org/10.20956/jiks.v6i1.9899>

Zheng, Y., Rugenstein, M., Pieper, P., Beobide-Arsuaga, G., & Baehr, J. (2022). El Niño–Southern Oscillation (ENSO) predictability in equilibrated warmer climates. *Earth Syst. Dynamic*, 13(4), 1611–1623, <https://doi.org/10.5194/esd-13-1611-2022>.