Peran Eddy dalam Distribusi Klorofil a di Selat Madura

Edwards Taufiqurrahman¹ dan Mochamad Furqon Azis Ismail¹

¹Pusat Penelitian Oseanografi - Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Jakarta.
Jl. Pasir Putih 1, Ancol Timur, Jakarta, Indonesia

E-mail: edwa006@lipi.go.id

Submitted 29 February 2020. Reviewed 18 May 2020. Accepted 2 July 2020.

DOI: [10.14203/oldi.2020.v5i2.308](https://doi.org/10.14203/oldi.2020.v5i2.308)

Abstrak

Selat Madura merupakan kawasan perikanan yang cukup penting disebabkan air dengan kandungan nutrisi tinggi yang mungkin memicu produktivitas primer di selat tersebut dan area sekitarnya. Informasi mengenai produktivitas primer di kawasan ini, terutama berkaitan dengan klorofil-a (Chl-a) sebagai indikator, sangat dibutuhkan. Sayangnya hanya terdapat sedikit informasi mengenai konsentrasi Chl-a dan kaitannya dengan sifat fisik air laut untuk selat Madura. Penelitian mengenai sebaran klorofil-a di Selat Madura dan asosiasinya dengan Eddy telah dilaksanakan. Penelitian ini bertujuan melengkapi informasi kesuburan laut di Selat Madura dengan menggunakan pendekatan penginderaan jauh dan model operasional oseanografi. Ditemukan bahwa keberadaan cekungan dalam di dasar Selat Madura menyebabkan munculnya Eddy di perairan selat, dan keberadaan Eddy ini teramati memengaruhi sebaran kandungan klorofil-a. Filamen Eddy membawa air dengan kadar nutrisi tinggi dari tepi pantai ke tengah lautan, sehingga terjadi penambahan kandungan nutrisi di tengah Selat Madura. Hal ini ditunjukkan dengan tingginya kandungan klorofil-a. Hasil dari penelitian ini mendemonstrasikan peran Eddy dalam mendistribusikan klorofil-a di perairan di Selat Madura.

Kata Kunci: klorofil-a, Eddy, filamen, Selat Madura, kesuburan laut.

Abstract

Distribution of chlorophyll-a associated with Eddy circulation in the Strait of Madura. The Madura Strait is an important area for fisheries due to nutrient rich water that may have triggering primary productivity of the strait and its surrounding. Information about seawater fertility of this area, particularly chlorophyll-a (Chl-a) as the indicator, are strongly needed. However, there are only few information about Chl-a concentrations and seawater physical properties that may affect it for the Madura Strait. The research on the Chl-a content in the Madura Strait and its relation to the Eddy has been conducted in order to fill the gap of information about the Madura Strait fertility by using remote sensing and operational oceanography modelling. The deep basin under the Madura Strait creates Eddy within the water body of the Madura Strait, and this Eddy appears to affects the Chl-a distribution. In addition, the filaments seems to carry high-nutrient water from the coast to the offshore, leading to the enhancement of Chl-a content offshore of Madura Strait. Results of this study demonstrate the role of Eddy in distributing Chl-a in the Madura Strait.

Keywords: chlorophyll-a, Eddy, filament, Madura Strait, seawater fertility.

Pendahuluan

Perairan Selat Madura merupakan perairan selat yang memisahkan Pulau Madura dengan Pulau Jawa bagian timur. Bagian utara Selat Madura dibatasi oleh pesisir Pulau Madura dan di selatan berbatasan dengan pesisir Jawa Timur. Selat ini diketahui mendapatkan pengaruh antropogenik yang kuat, karena banyak kota dan kabupaten di kawasan pesisir yang memiliki aktivitas ekonomi seperti industri, tambak, transportasi laut, serta terdapat banyak muara sungai (Nugraha & Yanagi, 2003). Salah satu sungai penting yang bermuara ke selat Madura adalah Kali Brantas, yang bercabang menjadi Kali Wonokromo (bermuara di Selat Madura melalui kota Surabaya) dan Kali Porong (bermuara melalui Sidoarjo). Kali Brantas secara umum membawa banyak muatan sedimen karena aktivitas di sepanjang daerah aliran sungai dan pembuatan dam/bendungan (Jennerjahn et al., 2004; Nugraha & Yanagi, 2003). Sementara itu Kali Porong menjadi salah satu pembawa lumpur vulkanik Sidoarjo ke laut (Jennerjahn et al., 2013).

Menurut Jennerjahn et al. (2004), kandungan nutrisi di Selat Madura yang sangat tinggi terdapat di kawasan muara sungai. Akan tetapi, semakin ke tengah selat nilainya berkurang secara drastis, sehingga disimpulkan kualitas perairan Selat Madura utamanya dipengaruhi oleh sungai. Berdasarkan penelitian yang pernah dilakukan oleh Nugraha & Yanagi (2003), dapat dituliskan hal berikut: (1) Di penghujung musim hujan sekitar Mei, curah hujan di daratan Jawa Timur sangat tinggi sehingga aliran sungai lebih deras, menyebabkan salinitas dan densitas Selat Madura berkurang dibandingkan di penghujung musim kemarau sekitar bulan September; (2) Selama musim kemarau, Kali Porong memiliki debit kecil sehingga transpor air tawar, sedimen dan nutrisi dari Kali Brantas terpusat di daerah Surabaya; (3) Rasio N:P di sebelah barat selat Madura lebih kecil dari 16, sehingga nitrat diduga sebagai faktor pembatas (*limiting factor*) di kawasan tersebut.

Secara umum, kandungan nutrisi di laut berkorelasi positif dengan klorofil-a. Peningkatan jumlah nutrisi menyebabkan fitoplankton tumbuh makin subur, dan ini umumnya ditunjukkan dengan peningkatan nilai klorofil-a (Jakobsen & Markager, 2016). Kandungan klorofil-a di laut menunjukkan kelimpahan jumlah fitoplankton di permukaan laut. Fitoplankton berperan sebagai produsen primer, yakni sebagai sumber makanan

bagi zooplankton, larva ikan, serta hewan laut herbivora lainnya (Middelburg, 2019; Salomon & Markus, 2018), sehingga kadar klorofil-a merupakan indikator kesuburan laut. Selain itu, klorofil-a digunakan juga dalam analisis perubahan iklim global karena fitoplankton menyerap CO₂ (Salomon & Markus, 2018). Penelitian mengenai distribusi spasial dan temporal klorofil-a sangat jarang dilakukan di Selat Madura, padahal informasi tersebut sangat penting sebagai informasi bagi nelayan dalam menentukan daerah *hotspot* tangkapan ikan. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk mengungkap karakteristik distribusi klorofil-a di perairan sekitar Selat Madura dengan menggunakan kombinasi penginderaan jauh dan model operasional oseanografi.

Metodologi

Lokasi penelitian perairan Selat Madura pada tulisan ini secara geografis berada pada 6,25° - 8,35° Lintang Selatan (LS) dan 111,95° - 114,95° Bujur Timur (BT) seperti yang terlihat pada Gambar 1a. Profil batimetri perairan Selat Madura diperoleh dari data batimetri milik *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO) (Weatherall et al., 2015). Penelitian ini menggunakan data penginderaan jauh yang dapat mengestimasi konsentrasi klorofil-a pada Juni 2019. Data estimasi konsentrasi klorofil-a di lapisan permukaan perairan Selat Madura yang merupakan produk satelit level 3 dari *MODerate resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), didapatkan dari *Integrated Marine Observing System* (IMOS), suatu infrastruktur penelitian kolaboratif nasional Australia. Data klorofil-a tersebut memiliki resolusi temporal harian dengan resolusi spasial sebesar 0,01° (≈ 1 km). Untuk mengetahui pola arus permukaan perairan Selat Madura, digunakan data output *ocean-reanalysis* dari model laut operasional MERCATOR OCEAN, suatu kerangka program uni-eropa untuk pemantauan lingkungan laut yang dikenal dengan nama *European Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS). Data arus dalam bentuk komponen zonal dan meridional memiliki resolusi temporal harian dengan dengan resolusi spasial sebesar 0,08° (≈ 8 km). Data arus resolusi harian selama satu bulan yang digunakan hanya pada saat data klorofil-a tersedia. Eddy diamati secara visual dengan menggunakan hasil pemantauan satelit untuk klorofil-a.

Gambar 1. (a) Lokasi penelitian di perairan Selat Madura. (b) Profil batimetri perairan Selat Madura (sumber data: *General Bathymetric Chart of the Oceans*; GEBCO).

Figure 1. (a) Research location in the Strait of Madura. (b) Bathymetric profile of Strait of Madura (data source: *General Bathymetric Chart of the Oceans*).

Hasil

Selama Juni 2019, jumlah total *image data* klorofil-a yang terekam oleh satelit MODIS ada 30. Namun hanya ada sekitar 8 *image data* klorofil-a yang dapat digunakan untuk penelitian

ini dengan cakupan bebas awan di atas 80%. Ke-8 gambar tersebut disajikan pada Gambar 2 sampai Gambar 5. *Image data* dengan cakupan bebas awan di atas 80% terdeteksi pada 5, 6, 10, 11, 17, 19, 21 dan 22 Juni 2019.

Gambar 2. Distribusi konsentrasi klorofil-a dan arus permukaan pada tanggal (a) 5 Juni 2019 dan (b) 6 Juni 2019 di perairan Selat Madura.

Figure 2. Distribution of chlorophyll-a concentration overlay with surface current on (a) 5 June 2019 and (b) 6 June 2019 in the Strait of Madura.

Gambar 3. Distribusi konsentrasi klorofil-a dan arus permukaan pada tanggal (a) 10 Juni 2019 dan (b) 11 Juni 2019 di perairan Selat Madura.

Figure 3. Distribution of chlorophyll-a concentration overlay with surface current on (a) 10 June 2019 and (b) 11 June 2019 in the Strait of Madura.

Gambar 4. Distribusi klorofil-a dan arus permukaan pada tanggal (a) 17 Juni 2019 dan (b) 19 Juni 2019 di perairan Selat Madura.

Figure 4. Chlorophyll-a distribution overlay with surface current on (a) 17 June 2019 and (b) 19 June 2019 in the Strait of Madura.

Gambar 5. Distribusi klorofil-a dan arus permukaan pada tanggal (a) 21 Juni 2019 dan (b) 22 Juni 2019 di perairan Selat Madura.

Figure 5. Chlorophyll-a distribution overlay with surface current on (a) 21 June 2019 and (b) 22 June 2019 in the Strait of Madura.

Gambar 6. Rata-rata bulanan distribusi klorofil-a dan arus permukaan pada bulan Juni 2019 di perairan Selat Madura.

Figure 6. Monthly mean chlorophyll-a distribution overlay with monthly mean surface current in June 2019 in the Strait of Madura.

Rangkuman kandungan klorofil-a dan arus di selat Madura ditampilkan dalam Tabel 1. Arus yang membentuk Eddy menyebabkan rata-rata arus di Selat Madura berkecepatan rendah, yakni 0,07 m/s. Pada posisi antara 113° 15' hingga 113° 50' (Gambar 6) merupakan kawasan dengan arus

minimum senilai 0 m/s karena merupakan daerah pusat Eddy, sementara arus maksimum hanya sebesar 1,31 m/s. Sementara kandungan klorofil-a di selat Madura memiliki nilai rata-rata 4,71 mg m^{-3} .

Tabel 1. Rangkuman klorofil-a dan arus di perairan Selat Madura pada bulan Juni 2019.

Table 1. Summary of chlorophyll-a and surface currents around the Strait of Madura in June 2019.

	Minimum	Maximum	Mean	Standard Deviation
Chlorophyll-a (mg m^{-3})	0.39	7.27	4.71	1.29
Current (m s^{-1})	0.00	1.31	0.07	0.11

Pembahasan

Kawasan pantai di sekeliling selat Madura memiliki kandungan klorofil-a yang sangat tinggi, ditunjukkan dengan profil warna merah pada keseluruhan gambar hasil pengamatan, yang diduga terkait dengan banyaknya masukan nutrisi

dari muara sungai dan aktivitas manusia. Ini sesuai dengan yang dikemukakan oleh Nugrahadi & Yanagi (2003) dan Jennerjahn et al. (2004). Sementara di bagian tengah Selat Madura nilai klorofil-a lebih kecil, ditunjukkan dengan warna yang cenderung biru dan ungu.

Secara umum, Selat Madura memiliki kedalaman dengan rata-rata sebesar 40 meter (Gambar 1b). Profil batimetri Selat Madura sangat unik dan bervariasi. Berdasarkan profil batimetri di Gambar 1b, terlihat adanya cekungan dalam (*deep basin*) dengan kedalaman di atas 100 meter pada posisi geografis $7,50^{\circ}$ - $8,25^{\circ}$ LS dan $113,25^{\circ}$ - $113,75^{\circ}$ BT. Bagian timur cekungan dalam ini dibatasi oleh gundukan dangkal berkedalaman sekitar 60 m, yang terhubung dengan celah mulut Selat Madura dengan kedalaman di atas 80 m yang berbatasan langsung dengan Laut Bali. Profil batimetri seperti ini diduga dapat menyebabkan turbulensi pada aliran arus yang masuk ke selat Madura dan menimbulkan Eddy. Dari gambaran awal terbentuknya Eddy di Selat Madura merupakan interaksi arus dengan profil unik batimetri Selat Madura sehingga diduga bahwa Eddy yang terbentuk merupakan tipe *Topographic Eddy* (Frajka-Williams, 2019). Arah pusaran Eddy cenderung searah jarum jam atau siklonik (*Cyclonic Eddy*), dan terbentuk pada rentang busur $113,25^{\circ}$ BT hingga $113,50^{\circ}$ BT seperti yang terlihat pada Gambar 2 sampai Gambar 5.

Aliran arus di selat Madura secara umum berasal dari Laut Jawa dan Laut Bali. Arus yang masuk ke Selat Madura ini membawa air dengan kandungan klorofil-a rendah, yang sesuai dengan karakteristik massa air permukaan Laut Jawa yang hangat dan minim nutrisi (Meirinawati & Iskandar, 2019). Air laut dengan kandungan klorofil-a yang rendah (di bawah $0,5 \text{ mg m}^{-3}$) ini bertemu dengan kandungan klorofil-a tinggi (di atas 2 mg m^{-3}) di sekeliling pesisir Selat Madura seperti yang terlihat pada Gambar 2. Terlihat bahwa arus permukaan yang masuk dari sebelah timur Selat Madura itu mendorong air di daerah pantai sebelah utara dan selatan Selat Madura yang berkandungan klorofil-a tinggi tersebut. Transpor air dari pantai ke tengah selat yang diinisiasi oleh Eddy dapat membantu redistribusi nutrisi dan zat organik antara daerah pantai dengan daerah lepas pantai (Nagai et al., 2015), dan Eddy yang terjadi di perairan pantai dan laut dapat mendistribusikan klorofil-a ke perairan sekitarnya (Azis Ismail & Ribbe, 2019; Gruber et al., 2011). Dalam penelitian kasus Selat Madura ini, Eddy berperan memperluas lingkup spasial produktivitas primer dengan mentransfer klorofil-a konsentrasi tinggi dalam bentuk filamen spiral searah jarum jam ke sekitar perairan Selat Madura.

Pada Gambar 2a, arus di Selat Madura bagian selatan Pulau Madura bertemu dengan garis pantai Pulau Madura (posisi geografis

sekitar $113,55^{\circ}$ - $113,65^{\circ}$ BT), menyebabkan alirannya berbelok ke arah selatan dan berputar balik ke utara membentuk Eddy. Kandungan klorofil-a dari perairan pantai tersebut ikut terdorong oleh pengaruh arus tersebut, terbawa oleh Eddy yang terbentuk oleh arus sehingga membentuk filamen klorofil-a. Hal yang sama masih terjadi di sebelah selatan Selat Madura sehari sebelumnya seperti pada Gambar 2b. Terlihat jelas terbentuknya filamen klorofil-a dan Eddy yang mengarah ke utara di bujur $113,25^{\circ}$ BT.

Dinamika harian klorofil-a di Selat Madura pada bulan Juni 2019 bisa disampaikan sebagai berikut. Pada 5 dan 6 Juni 2019 (Gambar 2a dan 2b), massa air yang masuk ke Selat Madura berasal dari Laut Jawa. Di Selat Madura, arus yang berada dekat pantai Pulau Madura mengalami pembelokan sehingga terbentuk Eddy dengan arah putaran searah jarum jam yang membawa serta kandungan klorofil-a filamen dari pantai ke tengah selat. Pada Gambar 2a (5 Juni 2019) Eddy terlihat di sekitar bujur $113^{\circ} 10'$ yang melengkungkan filamen yang terbawa ke dalam Eddy tersebut. Sementara untuk gambar 2b (tanggal 6 Juni 2019), di sisi selatan Selat Madura terbentuk filamen yang lain karena kandungan klorofil-a di kawasan tersebut terbawa serta oleh Eddy. Dari Gambar 2b juga terlihat bahwa filamen pertama (yang berasal dari sisi utara) membentuk pola spiral karena Eddy.

Di pekan berikutnya, tanggal 10 dan 11 Juni 2019 (Gambar 3), pola arus yang masuk ke Selat Madura telah berubah. Kali ini pola arus cenderung berasal dari Laut Bali dan mengarah ke utara/barat laut. Arah Eddy yang terbentuk tetap searah jarum jam seperti sebelumnya, namun filamen dari sisi utara selat Madura kali ini tidak begitu terlihat. Sementara filamen lebih jelas terbentuk di sisi selatan/barat daya Selat Madura. Selain tertarik ke dalam spiral Eddy, klorofil-a dari filamen ini juga tersebar ke sisi barat dan menyebabkan luasan area di sisi barat Selat Madura—yang memiliki kandungan klorofil-a tinggi—menjadi lebih besar.

Selanjutnya, pada 17 dan 19 Juni 2019 (Gambar 4) pola arus dari Laut Bali lebih condong ke barat, berbeda dengan pola arus sebelumnya yang terlihat pada Gambar 3. Dampak dari pola arus seperti ini adalah Eddy yang terbentuk menjadi lebih jelas dan daerah sebaran klorofil-a menjadi lebih luas. Pada 17 Juni 2019 (Gambar 4a) pada rentang posisi $113^{\circ} 30'$ - $113^{\circ} 38'$, arus ini mendorong massa air dari pantai di sisi utara selat Madura ke arah selatan lalu berputar

mengikuti spiral Eddy. Sementara di sisi barat daya Selat Madura, arus mendorong massa air ke arah utara/barat laut. Dorongan ini terakumulasi ke sisi barat selat Madura, sehingga lingkup kawasan yang memiliki kandungan klorofil-a di sisi barat itu membesar, sementara itu kandungan klorofil-a di tengah selat Madura juga meningkat. Pada 19 Juni (Gambar 4b) terlihat adanya peningkatan jumlah klorofil di sisi barat dekat Surabaya, diduga karena lanjutan pendorongan massa air dua hari sebelumnya. Sementara di tengah Selat Madura sendiri kandungan klorofil-a telah berkurang dibanding sebelumnya, tampak dari berkurangnya indikator warna biru cyan (mewakili kandungan klorofil-a antara 1 – 1,5 mg m⁻³) di tengah Selat Madura di sekitar koordinat 113,5 BT sampai 113,75 BT pada Gambar 4a (17 Juni 2019) dibandingkan dengan gambar 4b (19 Juni 2019).

Rata-rata bulanan klorofil-a di Selat Madura menunjukkan bahwa di kawasan dekat pantai, terutama di bagian barat selat Madura, kandungan klorofil-a sangat tinggi (Gambar 6). Arus minimum senilai 0 bisa diamati pada Gambar 6 pada posisi antara 113° 15' hingga 113° 50' yang merupakan kawasan pusat Eddy, sementara di sekelilingnya terlihat pola arus yang diperkirakan bisa mencapai maksimum senilai 1,31 m.s⁻¹. Melihat pola arus yang ditampilkan pada Gambar 2 hingga Gambar 5, terlihat bahwa arus di Selat Madura memiliki kecenderungan bergerak ke arah barat, namun dengan gerak memutar karena terbentuknya Eddy di tengah selat. Aliran arus itu kemudian menuju ke celah sempit dekat Gresik. Kecenderungan arus seperti ini yang membuat kandungan klorofil-a di pesisir dekat Surabaya – Gresik menjadi semakin besar, karena dorongan dari arus menyebabkan penumpukan nutrisi dan sedimen di kawasan tersebut, dan tidak menyebar ke tengah selat Madura.

Sementara itu meskipun di bagian tengah (lepas pantai) selat Madura kandungan klorofil-a di sana lebih rendah daripada di pantai, namun terlihat kecenderungan kandungan klorofil-a yang lebih besar dibandingkan dengan kandungan klorofil-a dari arus yang masuk dari timur selat Madura. Hal ini menunjukkan filamen Eddy yang muncul di tengah selat Madura membantu mendistribusikan kandungan klorofil-a dari kawasan pantai di utara dan selatan selat Madura ke arah tengah, sehingga karakteristik air masukan dari laut Jawa/Bali berkurang dan terbentuk karakteristik baru air selat Madura. Namun, produktivitas primer di lapisan permukaan di

pusat Eddy yang lokasinya tepat berada disekitar cekungan dalam ditengah Selat Madura cenderung lebih kecil kemungkinan karena ada penenggelaman air permukaan di pusat Eddy tersebut. Hal ini terbukti bahwa di pusat pusaran Eddy kandungan klorofil-a nilainya kurang dari 0,5 mg m⁻³ (Gambar 2-5). Pada Gambar 6 juga tampak rata-rata bulanan klorofil-a di pusat Eddy lebih rendah (kisaran 0 – 0,5 mg m⁻³) dibandingkan di tepian pusaran Eddy (koordinat 113,25 BT dan 113,5 BT).

Kesimpulan

Keberadaan cekungan dalam di tengah-tengah selat Madura menyebabkan aliran arus di Selat Madura mengalami pelenturan dan terbentuk aliran Eddy. Filamen-filamen yang terbentuk oleh Eddy membawa kandungan nutrisi yang berasal dari kawasan pantai di sekeliling Selat Madura ke bagian tengah selat. Dengan demikian, arus Eddy membantu pendistribusian kandungan nutrisi dari tepian selat ke tengah selat. Hal ini ditunjukkan dengan kandungan klorofil-a rata-rata di tengah selat Madura sebesar 4,71 mg m⁻³, dengan minimum 0,39 mg m⁻³ dan maksimum 7,27 mg m⁻³.

Persantunan

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada tim IMOS dan MERCATOR atas ijinnya untuk dapat menggunakan data klorofil-a dan arus di sekitar Selat Madura. Data IMOS dan MERCATOR masing-masing diakses melalui *Open Access to Ocean Data – Australian Ocean Data Network* dan *E.U Copernicus Marine Service Information*.

Kontribusi

Edward Taufiqurrahman dan Mochamad Furqon Azis Ismail berperan sebagai kontributor utama dalam artikel ini.

Daftar Pustaka

Azis Ismail, M. F., & Ribbe, J. (2019). On the cross-shelf exchange driven by frontal eddies along a western boundary current during austral winter 2007. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 227, 106314.

- <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106314>
 Frajka-Williams, E. (2019). Topographic Eddies. In *Encyclopedia of Ocean Sciences* (pp. 158–168).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10852-8>
- Gruber, N., Lachkar, Z., Frenzel, H., Marchesiello, P., Münnich, M., McWilliams, J. C., ... Plattner, G.-K. (2011). Eddy-induced reduction of biological production in eastern boundary upwelling systems. *Nature Geoscience*, 4(11), 787–792.
<https://doi.org/10.1038/ngeo1273>
- Jakobsen, H. H., & Markager, S. (2016). Carbon-to-chlorophyll ratio for phytoplankton in temperate coastal waters: Seasonal patterns and relationship to nutrients. *Limnology and Oceanography*, 61(5), 1853–1868.
<https://doi.org/10.1002/lno.10338>
- Jennerjahn, T. C., Ittekkot, V., Klöpper, S., Adi, S., Nugroho, S. P., Sudiana, N., ... Gaye-Haake, B. (2004). Biogeochemistry of a tropical river affected by human activities in its catchment: Brantas River estuary and coastal waters of Madura Strait, Java, Indonesia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 60(3), 503–514.
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2004.02.008>
- Jennerjahn, T. C., Jänen, I., Propp, C., Adi, S., & Nugroho, S. P. (2013). Environmental impact of mud volcano inputs on the anthropogenically altered Porong River and Madura Strait coastal waters, Java, Indonesia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 130, 152–160.
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.04.007>
- Meirinawati, H., & Iskandar, M. R. (2019). Karakteristik Fisika dan Kimia Perairan di Laut Jawa – Ambang Dewakang. *Oseanologi Dan Limnologi Di Indonesia*, 4(1), 41.
<https://doi.org/10.14203/oldi.2019.v4i1.140>
- Middelburg, J. J. (2019). *Marine Carbon Biogeochemistry*.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-10822-9>
- Nagai, T., Gruber, N., Frenzel, H., Lachkar, Z., McWilliams, J. C., & Plattner, G.-K. (2015). Dominant role of eddies and filaments in the offshore transport of carbon and nutrients in the California Current System. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(8), 5318–5341.
<https://doi.org/10.1002/2015JC010889>
- Nugrahadi, M. S., & Yanagi, T. (2003). Water Quality in Madura Strait, Indonesia. *Engineering Sciences Reports Kyushu University*, 25(1), 7–15.
<https://doi.org/10.15017/16684>
- Salomon, M., & Markus, T. (2018). Handbook on Marine Environment Protection. In M. Salomon & T. Markus (Eds.), *Handbook on Marine Environment Protection* (Vol. 1).
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-60156-4>
- Weatherall, P., Marks, K. M., Jakobsson, M., Schmitt, T., Tani, S., Arndt, J. E., ... Wigley, R. (2015). A new digital bathymetric model of the world's oceans. *Earth and Space Science*, 2(8), 331–345.
<https://doi.org/10.1002/2015EA000107>