ANCAMAN HIPOKSIA BAGI EKOSISTEM PESISIR; PENGGUNAAN INDEKS AMMONIA-ELPHIDIUM (A-E) SEBAGAI PROKSI

Ricky Rositasari^{1*}

¹Pusat Penelitian Oseanografi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Jl. Pasir Putih I, Ancol Timur, Jakarta Utara 14430

*Alamat email: rrositasari2016@gmail.com

ABSTRACT

Hypoxia is one of the aquatic phenomena caused by natural and/or anthropogenic factors. Eutrophication is the main trigger of hypoxia in coastal waters throughout the hemisphere. Hypoxia that occurs in aquatic ecosystems refers to the low concentration of dissolved oxygen in the water column to less than 2 mg/L. Hypoxia causes a double effect, low oxygen supply for biotic physiological process, and triggers ocean acidification. Prolonged hypoxic conditions will have a significant impact on the food webs in coastal waters and sea waters, further conditions will ultimately have an impact on capture-based fishing activities. The case of hypoxia in Indonesian coastal waters has not been widely revealed and has not been a concern to be understood or traced to its existence. Retrospective as well as actual traces of hypoxia were revealed, especially in the waters of Jakarta Bay. The retrospective study was carried out using proxies that have been used in various tropical and subtropical countries, the Ammonia-Elphidium (A-E) index (Foraminifera). The results show that several places in Jakarta Bay and Semarang coastal waters have experienced episodic hypoxic events for several centuries. A brief review of phenomenal hypoxic events in other parts of the world and preliminary information on recorded events in several Indonesian coastal waters are expected to open stakeholder awareness about further threats of hypoxia in Indonesian waters.

Keywords: hypoxia, coastal waters, A-E index.

PENDAHULUAN

Perairan pesisir di berbagai belahan dunia rentan terhadap aliran antropogenik yang dibawa oleh sungai ke daerah muara dan pesisir dalam berbagai skala. Akselerasi kegiatan industrialisasi dan pertanian modern telah menyebabkan gejala eutrofikasi semakin mengkhawatirkan (Rabais et al., 1991). Aliran yang berlangsung sepanjang tahun dengan beban kontaminasi yang cenderung terus meningkat di perairan pesisir telah menyebabkan terjadinya pengayaan, hipoksia, anoksia, dan kontaminasi logam. Dalam banyak kasus, hipoksia terjadi bersamaan dengan

oksigen terlarut rendah (DO) dan kondisi pH rendah (Gobler & Baumann, 2016).

Friedrich et al. (2014) menyatakan bahwa penipisan oksigen di perairan atau hipoksia terjadi pada saat konsumsi oksigen untuk kebutuhan fisiologis organisme atau untuk proses kimiawi melebihi pasokan oksigen yang tersedia, baik yang berasal dari lapisan air yang berdekatan, dari atmosfer, maupun dari hasil fotosintesis. Peningkatan konsumsi oksigen pada organisme biasanya terkait pembusukan dan reaksi kimiawi dari limbah organik. Namun demikian kondisi hidrodinamika spesifik juga dapat membuat sistem air secara alami rentan

terhadap penipisan oksigen, seperti badan air tertutup atau semi tertutup dengan pertukaran air terbatas dan retensi air yang lama seperti fjord dan danau yang terlindungi oleh angin atau lensa air tawar di pesisir dekat muara sungai (Friedrich et al., 2014).

Istilah "zona mati" sering digunakan mengacu pada tidak adanya kehidupan (selain bakteri) dari habitat tanpa oksigen atau anoksia (*Committee on Environment and Natural Resources*, 2010). Secara umum, organisme membutuhkan oksigen untuk melakukan proses fisiologis tubuhnya, kecuali pada beberapa spesies bakteri dan beberapa taksa yang dapat beradaptasi pada kondisi hipoksia bahkan anoksia dalam waktu yang tidak terlalu lama. Ketidakmampuan untuk keluar dari daerah dengan oksigen rendah membuat spesies dengan lokomosi rendah seperti tiram dan kerang sangat rentan terhadap hipoksia karena dapat menyebabkan stres dan mati karena proses respirasi dan proses fisiologis lainnya terhambat. Kondisi hipoksia yang berkepanjangan akan berdampak signifikan pada siklus jaring-jaring makanan di pesisir yang *vice versa* akan berpengaruh pada jaring makanan di laut, kondisi tersebut pada akhirnya berdampak pada kegiatan ekonomi berbasis ikan tangkap. Bagi organisme dengan kemampuan lokomosi tinggi, dapat melarikan diri saat oksigen terlarut menjadi terlalu rendah. Namun demikian, banyak jenis ikan yang terancam mati ketika konsentrasi oksigen terlarut turun dengan cepat (Rabais & Turner, 2001). Penelitian terbaru berusaha menggambarkan bagaimana hilangnya habitat terkait hipoksia dapat merugikan secara ekologis dan ekonomi, seperti berkurangnya pertumbuhan spesies yang

dipanen secara komersial dan hilangnya keanekaragaman hayati, habitat, dan biomassa (*Committee on Environment and Natural Resources*, 2010).

Kasus hipoksia di dasar perairan paparan Teluk Meksiko bagian utara terungkap pada tahun 1985, saat dilaksanakannya kegiatan pemetaan secara sistematis dan monitoring oksigen (Rabalais et al. 1991). Saat itu hipoksia di perairan didefinisikan sebagai oksigen terlarut dibawah 2 mg/L yang terekam secara sesaat dan terlokalisasi (Turner & Allen 1982). Sejak saat itu banyak penelitian dilakukan terkait pemahaman tentang hipoksia hubungannya dengan musim dan distribusi tahunan serta variabilitasnya, juga sejarah dan penyebab dinamikanya (Rabais et al., 2007). Pada awal abad ke 20, teridentifikasi lebih dari 400 zona hipoksik di seluruh pesisir di dunia (Diaz et al. 2004). Jumlah zona terindikasi ini akan terus meningkat dengan bertambahnya aliran nutrisi dan meningkatnya suhu atmosfer, sehingga kondisi ini harus menjadi perhatian bagi pemangku kepentingan.

Beberapa perairan pesisir Korea telah mengalami hipoksia sejak tahun 1970an, Teluk alami Jinhae dan Teluk buatan Shihwa Bay telah dianggap sebagai "Korean dead zones" (Lee et al., 2018). Kejadian hipoksia di Teluk Jinhae disebabkan oleh eutrofikasi yang berasal dari buangan domestik dan pertanian, sedangkan di Teluk Shihwa disebabkan oleh eutrofikasi, pertanian dan industri. Lebih lanjut Lee et al. (2018) menyebutkan bahwa masa air hipoksik di dasar perairan dan adanya stratifikasi lapisan air disebabkan karena ketidakseimbangan antara N dan P antara masa air di lapisan dasar dan di permukaan, yang

menyebabkan kematian masal banyak taksa, berkurangnya jumlah spesies, kelimpahan dan keanekaragaman.

Metode yang digunakan untuk mendeteksi kejadian hipoksia secara *real time* adalah dengan mengukur DO (oksigen terlarut) secara konvensional maupun dengan menggunakan Kit seperti *autonomous underwater vehicles* (AUV) (Lee et al., 2018; Susana et al., 2008; Hayami et al., 2017). Penggunaan satelit untuk memetakan wilayah yang lebih luas juga dilakukan dalam pemantauan kasus hipoksia oleh NOAA (*Committee on Environment and Natural Resources*, 2010), serta melakukan pemodelan dengan menggunakan data oseanografi *real time* dalam periode pemantauan yang panjang dikonfirmasi dengan data satelit (Kim et al., 2020; Marimoto et al., 2019). Dari semua metode yang telah digunakan belum ada yang dapat mendeteksi kejadian lebih dari 40 tahun, karena mengandalkan data *real time* yang sangat terkait dengan kelengkapan data yang sudah terkumpul dan kemajuan peralatan penelitian, seperti ketelitian kit untuk pengukuran di lapangan dan kecanggihan satelit. Penggunaan indeks sebagai proksi, dikembangkan berdasarkan konsep lingkungan pengendapan dalam ilmu sedimentologi dan stratigrafi yaitu mengidentifikasi lingkungan pengendapan lapisan sedimen berdasarkan warna, ukuran fraksi, mineral, dan jejak kehidupan (fosil). Penggunaan foraminifera sebagai salah satu penciri lingkungan pengendapan telah dimulai sejak sesudah perang dunia pertama (Boltovskoy & Wright, 1976), untuk menilai kondisi lingkungan resen telah dimulai pada era sebelum tahun 1920an (Cushman, 1928). Kajian paleoekologi dan paleoceanografi dengan mengguna-

kan berbagai macam proksi merupakan cara untuk mendapatkan informasi dari kejadian di masa yang lalu. Seperti juga pemodelan yang mengembangkan informasi saat ini untuk memprediksi masa yang akan datang. Informasi masa lalu dari kajian paleo juga digunakan untuk membaca kecenderungan sebuah kejadian alam di suatu tempat pada masa mendatang.

Penggunaan biota bersel tunggal seperti foraminifera dalam kegiatan pemantauan pesisir sangat efisien. Dalam beberapa tahun terakhir penggunaan foraminifera bentik sebagai proksi telah menjadi lebih luas cakupannya, terutama sebagai proksi variabilitas oksigen terlarut dan fluks karbon organik (Murray, 2000). *Ammonia* dan *Elphidium* adalah foraminifera bentik yang beradaptasi dengan baik di perairan pantai (Murray, 2006; Samir, 2000). *Ammonia* mampu mentolerir deplesi oksigen yang berkepanjangan dibandingkan *Elphidium* (Gupta dan Platon, 2006). Gupta dan Platon (2006) melaporkan indeks *Ammonia-Elphidium* (AE) dari perairan pantai tenggara dan timur AS mampu memelacak jejak *paleohypoxia* di perairan pesisir dengan sangat informatif dalam skala dekadal, dari jejak (rekaman) yang tersimpan dalam sedimen.

Kasus hipoksia di perairan pesisir Indonesia belum banyak diungkap dan belum menjadi perhatian untuk dipahami maupun ditelusuri keberadaannya di perairan-perairan pesisir. Perkembangan kegiatan ekonomi, baik yang berbasis industri dalam berbagai skala dan pertanian dalam berbagai tingkat intensifikasi telah menjadi pilar ekonomi nasional yang semakin bergaung di kancah global. Namun penghitungan secara matematis beban pencemar di perairan sebagai produk samping dari

kegiatan ekonomi tersebut belum dilakukan secara seksama oleh pihak yang bertanggung jawab sekalipun, yaitu kementerian dan lembaga terkait. Magnifikasi beban cemaran yang menjadi salah satu penyebab eutrofikasi tidak dapat dipungkiri telah terjadi dalam perioda waktu yang panjang. Beberapa tahun terakhir ini usaha untuk mengidentifikasi kejadian hipoksia di beberapa pesisir Indonesia, terutama perairan di Teluk Jakarta mulai bermunculan, salah satunya yang telah dilakukan oleh Susana et al. (2009); Rositasari & Suyarso (2014); Hayami et al. (2017); dan Ladwig et al. (2016). Artikel ini akan memaparkan tentang krusialnya informasi tentang hipoksia bagi para pemangku kepentingan, mengingat kondisi penipisan oksigen terlarut di perairan merupakan *silent killer* (ancaman dalam senyap), terutama untuk konsep pembangunan yang berkelanjutan bagi perairan pesisir di Indonesia. Penggunaan indeks dalam pemantauan kondisi perairan dimaksudkan sebagai kajian awal untuk mendeteksi kondisi tertentu. Indeks A-E diformulasikan untuk merekam indikasi penipisan oksigen pada suatu perairan secara *real time* maupun untuk kajian retrospeksi berdasarkan data kelimpahan foraminifera benthik *Ammonia* dan *Elphidium*.

ANCAMAN HIPOKSIA PADA EKOSISTEM PESISIR

Hipoksia

Hipoksia adalah gejala yang dipicu oleh eutrofikasi terkait pengayaan nutrisi. Saat ini hipoksia telah menjadi masalah di hampir seluruh perairan pesisir di dunia (Diaz et al. 2004). Hipoksia adalah salah satu fenomena akuatik yang disebabkan

oleh faktor alami dan/atau antropogenik. Komite Lingkungan dan Sumber Daya Alam (*Committee on Environment and Natural Resources*) USA (2010) menyebutkan bahwa hipoksia yang terjadi pada ekosistem perairan mengacu pada rendahnya konsentrasi oksigen terlarut dalam kolom air hingga kurang dari 2 mg/L. Hipoksia sangat berpengaruh terhadap kesehatan ekosistem karena dapat menyebabkan tekanan fisiologis hingga kematian pada organisme perairan (Gustafsson & Nordberg, 2000). Kondisi hipoksia di perairan dapat terjadi sesaat dan atau secara berkala. Pada kondisi yang lebih ekstrem, hipoksia pada suatu perairan dapat berkembang menjadi anoksia (ketiadaan oksigen terlarut).

Teluk Jakarta adalah salah satu perairan yang saat ini sedang menghadapi ancaman hipoksia, penelitian Susana et al. (2009) pada tahun 2008 telah mengindikasikan adanya penurunan konsentrasi oksigen terlarut dibandingkan penelitian sebelumnya hingga mencapai < 1 mg/L di beberapa titik. Penelitian yang lebih aktual telah dilakukan oleh Hayami et al. (2017) di Teluk Jakarta pada tahun 2016, menemukan masa air dengan konsentrasi oksigen terlarut mencapai kurang dari 2 mg/L di semua lokasi penelitian. Hal tersebut menunjukkan masa air yang hipoksik telah terbentuk sepanjang tahun. Penelitian yang sama mengindikasikan adanya variasi masa air hipoksik yang dipengaruhi oleh musim, yaitu adanya penurunan pada bulan Februari saat pertengahan musim hujan (monsoon barat daya). Masa air hipoksik ini akan mengalami meningkat pada bulan November hingga Desember, yaitu pada musim peralihan dari musim kemarau menuju musim penghujan. Masa air hipoksik biasanya terbentuk di dasar

perairan pada kedalaman lima sampai 15 m, terutama di bagian timur teluk (Ladwig et al., 2016). Lebih jauh Ladwig et al. (2016), berhasil mengidentifikasi adanya konsentrasi oksigen terlarut di bawah 3 mg/L mulai dari dasar perairan hingga ke lapisan permukaan pada bulan Mei 2016. Penelitian yang sama menunjukkan bahwa defisiensi oksigen teridentifikasi pada wilayah seluas 20 km² di sebelah timur Teluk Jakarta dengan tingkat saturasi oksigen berkurang hingga 60%, setara dengan tingkat konsentrasi yang membahayakan yaitu 4,0 mg/dm³ O₂. Nilai minimum absolut yang terdeteksi di Teluk Jakarta pada penelitian ini adalah 51% O₂ atau 3.2 mg/dm³ O₂. Kedua hasil pengamatan yang dilaksanakan di Teluk Jakarta dalam periode lima tahun terakhir tersebut menunjukkan bahwa untuk kasus perairan Teluk Jakarta terkait konsentrasi oksigen terlarut, Indonesia tidak dapat memenuhi standar untuk kualitas perairan laut.

Di antara faktor-faktor pemicu hipoksia, eutrofikasi yang dipengaruhi dan/atau bersinergi dengan kontaminan logam di daerah perairan dianggap sebagai pemicu utama. Eutrofikasi antropogenik yang menyebabkan hipoksia (*hypoxia*) di lingkungan pesisir dangkal secara signifikan dianggap sebagai masalah dan telah diteliti secara intensif di berbagai tempat (Boesch et al. 2001; Kemp et al. 2005). Walaupun kajian monitoring tentang urbanisasi berpengaruh terhadap komunitas bentik telah banyak dilakukan, tetapi pengamatan dampak dalam jangka panjang dari eutrofikasi dan hipoksia terhadap metazoa bentik belum banyak dilakukan. Salah satu metode pengamatan yang dikembangkan dalam beberapa dekade terakhir adalah dengan membaca bukti geologis dan paleontologis dari data sedimen hasil kor.

Sedimen hasil kor (*core*) memberikan data dari perekaman waktu yang panjang yang merekam petunjuk dari flora dan fauna ekosistem masa lalu (Karlsen et al. 2000; McGann et al. 2003).

Kajian hipoksia di wilayah pesisir, terutama di Indonesia merupakan agenda yang sangat penting mengingat tekanan eutrofikasi sangatlah laten dengan akselerasi pembangunan yang sedang dan terus dilakukan di berbagai bidang dalam lingkup nasional. Banyak pihak yang sesungguhnya bertanggung jawab terhadap pemantauan penipisan oksigen di perairan, termasuk pihak-pihak yang bertanggung jawab dalam pemantauan kualitas perairan. Namun hingga saat ini, secara nasional maupun dalam lingkup sektoral belum ada pihak yang menganggap *dead zone* sebagai ancaman, walaupun bukti-bukti sejak tahun 2008 sudah bermunculan. Kajian paleohipoksia menggunakan indeks A-E dilaksanakan dan bukti-bukti yang ada dipaparkan untuk membuka wawasan pemangku kepentingan yang lebih luas, terkait ancaman penipisan oksigen.

Indeks A-E sebagai proksi penilaian tingkat hipoksia ekosistem pesisir

Indeks A-E pertama kali digunakan pada tahun 1996 di perairan pesisir Louisiana sebagai proksi paleohipoksia yang terekam dalam sedimen. Indeks ini menggunakan taksa yang memiliki sebaran luas dan terawetkan dengan baik dalam sedimen. Foraminifera bentik *Ammonia* dan *Elphidium* digunakan dalam indeks ini, karena *Ammonia* memiliki toleransi yang lebih baik terhadap penurunan konsentrasi oksigen terlarut dibandingkan dengan *Elphidium* dan A-E indeks berkorelasi dengan konsentrasi

karbon organik di lapisan permukaan perairan (Gupta & Platon, 2006). Penggunaan indeks ini kemudian dikembangkan oleh penemu formula tersebut, juga oleh peneliti lain untuk menilai kondisi hipoksia secara *real time* (waktu aktual di mana suatu proses atau peristiwa terjadi) maupun dalam bentuk kajian paleo. Yang membedakan pada kajian retrospeksi adalah adanya pengukuran umur absolut lapisan sedimen inti (Core) dengan menggunakan Pb₂₁₀, untuk mengidentifikasi waktu kejadian hipoksia tersebut berlangsung. Pada kajian *real time*, sampel yang digunakan berasal dari sampel permukaan sedimen, yakni sedimen permukaan setebal dua cm untuk merepresentasikan waktu aktual saat kejadian hipoksia. Indeks A-E mengacu pada formula yang disusun oleh Gupta et al. (1996), yaitu:

$$[NA/(NA+NE)] \times 100$$

- NA = jumlah individu *Ammonia* dalam sampel sedimen
- NE = jumlah individu *Elphidium* dalam sampel sedimen

Skala nilai pada indeks ini berkisar antara 0 sampai dengan 100. Nilai 0 menunjukkan tidak ditemukan kejadian hipoksia di perairan tersebut, sedangkan nilai di atas 0 menunjukkan adanya kejadian hipoksia dalam skala sangat

rendah, menengah ataupun intensif. Skala intensif berkisar antara 90 sampai dengan 100).

Ammonia dan *Elphidium* (Gambar 1) adalah foraminifera bentik yang beradaptasi dengan baik di perairan pantai (Murray, 2006; Samir, 2000), sehingga kedua taksa tersebut dapat ditemukan melimpah di perairan pesisir. *A. beccarii* mampu bertahan dalam lingkungan oksigen rendah hingga <0,1 mg / L selama satu minggu karena spesies ini memiliki sifat anaerob fakultatif (Murray, 2006).

Penggunaan indeks AE sebagai proksi hipoksia

Gupta & Platon (2006) telah menggunakan indeks ini untuk mengetahui jejak paleohipoksia di perairan pesisir Louisiana di Teluk Meksiko (Gambar 2a) dengan menggunakan sampel inti (core), dan berhasil menemukan jejak paleohipoksia mulai kurun tahun 1700 sampai dengan tahun 2000. Khusus untuk kajian beberapa dekade terakhir grafik indeks A-E di pesisir Louisiana dapat dilihat pada gambar 2b. Kecenderungan peningkatan yang tajam kejadian hipoksia terlihat mulai dari pertengahan 1970 sampai tahun 1990.

Gambar 1. (a) *Elphidium*; (b) *Ammonia* tampak dorsal dan (c) *Ammonia* tampak ventral.

Gambar 2a. Lokasi penelitian Gupta dan Platon (1996) di perairan pesisir Louisiana di Teluk Meksiko; b. Indeks A-E yang meningkat drastis selama tiga dekade (Gupta dan Platon, 2006).

Penelitian Martínez-Colón & Hallock (2010) di pesisir utara Puerto Rico yang memiliki kandungan material organik 10 – 23% dan batuan pirit framboidal mengindikasikan kondisi oksigen yang rendah. Penghitungan indeks A-E di lokasi tersebut menunjukkan nilai antara 69 sampai 100, menguatkan indikasi telah terjadinya episode hipoksia di perairan pesisir Puerto Rico. Untuk perairan

Indonesia, Rositasari & Suyarso (2014) telah mengidentifikasi bukti adanya hipoksia di perairan Teluk Jakarta berdasarkan sampel kor (inti). Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa Teluk bagian barat memiliki karakter hipoksia dalam perioda panjang dengan indeks berkisar mulai dari 98,41 hingga 99,9 mulai dari akhir abad ke 18 hingga awal abad ke 20 (Gambar 3a), kecuali pada

Gambar 3. (a) Indeks A-E di pesisir barat Teluk Jakarta; (b) Nilai indeks A-E di pesisir timur Teluk Jakarta (Rositasari & Suyarso, 2014).

tahun 1982 dengan indeks sedikit lebih rendah yaitu 95,12. Berbeda dengan kondisi dasar perairan Teluk Jakarta bagian timur yang memperlihatkan adanya peningkatan nilai indeks A-E (Gambar 3b) pada tahun 1860 hingga tahun 1960, kenaikan lebih progresif terjadi pada periode tahun 1960 hingga tahun 1980 hingga nilainya mencapai 46,15. Mulai tahun 1980 hingga 2008 terjadi peningkatan nilai indeks A-E yang sangat tajam, mengindikasikan aliran nutrien dari daratan menuju perairan pesisir timur Teluk Jakarta pada periode tahun 1980an mengalami peningkatan dan telah menyebabkan oksigen terlarut di dasar perairan mengalami penurunan.

Pregmolato et al. (2018), menggunakan indeks A-E untuk melihat dampak buangan limbah terhadap konsentrasi oksigen terlarut di dasar perairan di pesisir timur laut Brazil (Gambar 4a). Dari penelitian ini ditemukan indeks A-E mencapai 100 % di titik pembuangan dan daerah sekitarnya, hal ini menunjukkan terjadi penipisan oksigen di lokasi tersebut. Indeks *Ammonia Elphidium* ditemukan lebih rendah di stasiun kontrol

CO (Gambar 4b), yang mengindikasikan adanya gradasi penipisan oksigen yang berbanding lurus dengan jarak dan titik pembuangan.

Kajian terakhir terkait hasil perekaman kejadian hipoksia di pesisir Tangerang, Cilingcing dan muara banjir kanal timur (BKT), Semarang dengan menggunakan sampel inti (core) menunjukkan telah terjadinya penipisan oksigen pada berbagai tingkat (Rositasari et al., 2019). Dasar perairan pesisir Tangerang sejak lebih dari 100 tahun yang lalu telah mengalami hipoksia, peningkatan tajam terjadi pada akhir 1990an hingga beberapa tahun terakhir mencapai nilai indeks 90 (Gambar 5). Gejala awal hipoksia di pantai Cilingcing terjadi pada tahun 1940an, meningkat secara dramatik pada tahun 1960an namun masih pada tingkat yang lebih rendah daripada perairan Tangerang. Di muara Banjir kanal timur (BKT), Semarang penipisan oksigen terjadi pada tingkat yang lebih tinggi daripada perairan Tangerang dengan kisaran nilai indeks 70 hingga 100, sejak akhir 1940an hingga beberapa tahun terakhir (Rositasari et al., 2019).

Gambar 4. (a) Lokasi penelitian di pesisir timur Laut Brazil; (b) Indeks A-E dari sampel sedimen permukaan (Pregmolato et al., 2018).

Gambar 5. Indeks A-E dari dasar perairan pesisir Tangerang, Cilincing dan muara banjir kanal timur (BKT).

PENUTUP

Geliat pembangunan yang akselerasinya terus di tingkatkan di hampir seluruh wilayah Indonesia, merupakan indikasi kuat beratnya beban kontaminasi di wilayah hilir, yaitu muara dan pesisir. Eutrofikasi sporadis di berbagai belahan dunia telah menjadi contoh bagaimana hipoksia akan menjadi ancaman perairan pesisir saat ini maupun di masa yang akan datang. Hipoksia yang terjadi pada ekosistem perairan mengacu pada rendahnya konsentrasi oksigen terlarut dalam kolom air hingga kurang dari 2 mg/L. Kondisi hipoksia yang berkepanjangan pada suatu perairan akan berdampak signifikan pada jaring-jaring makanan di perairan pesisir maupun di perairan laut lepas, kondisi lebih lanjut akan berdampak pada kegiatan perikanan berbasis ikan tangkap. Beberapa penelitian yang dilaksanakan sejak tahun 2008 hingga tahun 2016 memperlihatkan

bahwa Teluk Jakarta adalah salah satu perairan yang saat ini sedang menghadapi ancaman hipoksia. Penggunaan indeks dalam pemantauan kondisi perairan dimaksudkan sebagai kajian awal untuk mendeteksi kondisi tertentu. Indeks A-E diformulasikan untuk merekam indikasi penipisan oksigen pada suatu perairan secara *real time* maupun untuk kajian retrospeksi berdasarkan data kelimpahan foraminifera benthik *Ammonia* dan *Elphidium*. Hasil beberapa penelitian menunjukkan bahwa beberapa tempat di perairan pantai Teluk Jakarta dan Semarang telah mengalami peristiwa hipoksia episodik selama beberapa abad, besar kemungkinan kondisi tersebut akan berulang. Untuk itu sekarang saatnya kementerian dan lembaga terkait termasuk para peneliti mengambil peran dalam mengungkap, menginformasikan dan mencari terobosan untuk mengatasi masalah penurunan konsentrasi oksigen terlarut di perairan Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Boesch, D.F., Brinsfield, R.B., & Magnien, R.E. (2001). Chesapeake Bay eutrophication—scientific understanding, ecosystem restoration, and challenges for agriculture. *J. Environ. Qual.*, 30: 303-320.
- Boltovskoy, E. & Wright, R. (1976). *Recent Foraminifera*. Dr. W. Junk b.v. publishers the Hague: 513 pp.
- Committee on Environment and Natural Resources. (2010). Scientific Assessment of Hypoxia in U.S. Coastal Waters. Interagency Working Group on Harmful Algal Blooms, Hypoxia, and Human Health of the Joint Subcommittee on Ocean Science and Technology. Washington, DC.
- Cushman, J.A. (1928). *Foraminifera; their classification and economic use*. Sharo., Mass., USA: 420 pp
- Diaz, R.J., Nestlerode, J., & Diaz, M.L. (2004). A global perspective on the effects of eutrophication and hypoxia on aquatic biota, p. 1-33. In G. L. Rupp and M. D. White (eds.), *Proceedings of the 7th International Symposium on Fish Physiology, Toxicology and Water Quality, Tallinn, Estonia*. U.S. Environmental Protection Agency, Ecosystems Research Division, Athens, Georgia.
- Friedrich, J., Janssen, F., Aleynik, D., Bange, H.W., Boltacheva, N., & Wenzhöfer, F. (2014). Investigating hypoxia in aquatic environments: diverse approaches to addressing a complex phenomenon. *Biogeosciences*, 11: 1215-1259
- Gobler, C.J. & Baumann, H. (2016). Hypoxia and acidification in ocean ecosystems: coupled dynamics and effects on marine life. *Biol. Lett.*, 12(5): 20150976.
- Gupta, B.K. & Platon, E. (2006). Tracking past sedimentary records of oxygen depletion in Coastal waters: use of Ammonia-Elhidium Foraminiferal index. *Jour. Coast. Resc.*, Spec.issue, 39: 1351-1355.
- Gupta, B.K., Turner, R.E., & Rabalais, N.N. (1996). Seasonal oxygen depletion in continental-shell waters of Louisiana: historical record of benthic foraminifers. *Geology*, 24: 227-230
- Gustafsson, M., & Nordberg, K. (2000). Living (stained) benthic foraminifera and their response to the seasonal hydrographic cycle, periodic hypoxia and to primary production in Havstens Fjord on the Swedish west coast. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 51(6): 743-761.
- Hayami, H., Morimoto, A., Sudaryanto, A., Sachoemar, S., Soeyanto, E., & Oda, S. (2017). Hypoxic water mass in Jakarta Bay, Indonesia. *JpGU-AGU Joint Meeting 2017*.
- Karlsen, A.W., Cronin, T.M., Ishman, E.S., Willard, D.A., Holmes, C.W., & Kerhin R. (2000). Historical trends in Chesapeake Bay dissolved oxygen based on benthic Foraminifera from sediment cores. *Estuaries*, 23: 488-508.
- Kemp, W.M., Boynton, W.R., Adolf, J.E., Boesch, D.F., Boicourt, W.C., & Stevenson, J.C. (2005). Eutrophication of Chesapeake Bay: Historical trends and ecological interactions. *Mar. Ecol.Prog. Ser.*, 303: 1-29.
- Kim, Y.H, Son, S., Kim, H.C., Kim, B., Park, Y.G., & Ryu, J. (2020). Application of satellite remote sensing in monitoring dissolved oxygenvariabilities: A case study for coastal waters in Korea. *Environment International*, 134: 105301.
- Ladwig, N., Hesse, K.J., Van der Wulp, S., Damar, A., & Koch, D. (2016). Pressure on oxygen levels of Jakarta Bay. *Mar. Pollut. Bull.*, 110(2).
- Lee, J., Park, K.T., Lim, J.H., Yoon, J.E., & Kim, I.N. (2018). Hypoxia in Korean Coastal Waters: A Case Study of the Natural Jinhae Bay and Artificial

- Shihwa Bay. *Front. Mar. Sci.* 5:70. doi.org/10.3389/fmars.2018.00070.
- Morimoto, A., Mino, Y., Buranapratheprat, A., Kaneda, A., Dom, S.T.U., & Guo, X. (2019) Hypoxia in the Upper Gulf of Thailand – Hydro-graphic observation and modeling. International symposium on coastal ecosystem change in Asia: hypoxia, eutrophication, and nutrient conditions. Date: November 14-15, 2019.
- Martínez-Colón, M. & Hallock, P. (2010). Preliminary Survey on Foraminiferal Responses to Pollutants in Torrecillas Lagoon Puerto Rico. *Caribbean Jour. Sci.*, 46(1): 106-111.
- McGann, M., Alexander, C.R., & Bay, S.M. (2003). Response of benthic foraminifers to sewage discharge and remediation in Santa Monica Bay, California. *Mar. Environ. Res.*, 56: 299-342.
- Murray, J. (2006). *Ecology and application of benthic foraminifera*. Cambridge University Press, Cambridge: 426 pp.
- Murray, J.W. (2000). The Niche of Benthic Foraminifera, Critical Thresholds And Proxies. Micro Notes, *Marine Micropaleontology*.
- Pregolato, L.A., De Almeida Viana, R., Passos, C.C., Misailidis, M.L., & Duleba, W. (2018). Ammonia-Elphidium Index as A Proxy for Marine Pollution Assessment, Northeast Brazil. *Journal of Sedimentary Environments* Published by Universidade do Estado do Rio de Janeiro 3(3): 176-186. doi.org/10.12957/jse.2018.38001.
- Rabalais, N.N., Turner, R.E., Sen Gupta, B.K., Platon, E., & Parsons, M.L. (2007). Sediments tell the history of eutrophication and hypoxia in the northern Gulf of Mexico. *Ecol. Appl.* 17: S129-S143. doi.org/10.1890/06-0644.1
- Rabalais, N.N. & Turner, R.E. (2001). Responses of nekton and demersal and benthic fauna to decreasing oxygen concentrations, p. 115-128. In N.N. Rabalais and R.E. Turner (eds.), *Coastal Hypoxia: Consequences for Living Resources and Ecosystems*. Coastal and Estuarine Studies 58, American Geophysical Union, Washington, D.C.
- Rabalais, N.N., Turner, R.E., Wiseman Jr., W.J., & Boesch, D.F. (1991). A brief summary of hypoxia on the northern Gulf of Mexico Advances in the Gulf of Mexico 771 Mexico continental shelf: 1985-1988, p. 35-47. In R. V. Tyson and T. H. Pearson (eds.), *Modern and Ancient Continental Shelf Anoxia*. Geological Society Special Publication No. 58, The Geological Society, London, England.
- Rositasari, R., Puspitasari, R., Suratno & Purbonegoro, T. (2019). The Use of Ammonia-Elphidium (A-E) Index in Jakarta Bay and Semarang Coastal Waters, Indonesia. The 5th International Symposium on Applied Chemistry (ISAC, 2019).
- Rositasari, R. & Suyarso. (2014). Distribusi Vertikal Foraminifera Bentik Sebagai Proksi Perubahan Ekologi Pesisir: Kajian Awal Dari Dua Kor. *Oseanologi dan Limnologi di Indonesia* 40(3): 295-309.
- Samir, A.M. (2000). The response of benthic foraminifera and ostracods to various pollution sources: A study from two lagoons in Egypt. *Journal of Foraminiferal Research*, 30(2): 83-98.
- Susana, T., Kiswara, W., Tarigan, S., Nurhayati, Rositasari, R., Sidabutar, T., & Munawir K. (2009) *Dinamika Pesisir Kepulauan Seribu Bagian Selatan*. Laporan Penelitian Pusat Penelitian Oseanografi-LIPI: 155 pp.
- Turner, R.E. & Allen, R.L. (1982). Bottom water oxygen concentration in the Mississippi River Delta Bight. *Contributions in Marine Science*, 25:161-172.