



HAL
open science

Distribution and abundance of *Pyrodinium bahamense* cyst in the harmful algal blooms risk waters in Indonesia

Arief Rachman, Mariana D. Bayu Intan, Hikmah Thoha, Oksto Ridho Sianturi, Estelle Masseret

► To cite this version:

Arief Rachman, Mariana D. Bayu Intan, Hikmah Thoha, Oksto Ridho Sianturi, Estelle Masseret. Distribution and abundance of *Pyrodinium bahamense* cyst in the harmful algal blooms risk waters in Indonesia. *OLDI (Océanologie et Limnologie en Indonésie)*, 2021, 6 (1), pp.37–53. 10.14203/oldi.2021.v6i1.337 . hal-03415667

HAL Id: hal-03415667

<https://hal.umontpellier.fr/hal-03415667>

Submitted on 16 Dec 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike| 4.0 International License



Distribusi dan Kelimpahan Kista *Pyrodinium bahamense* di Perairan Rawan Marak Alga Berbahaya di Indonesia

Arief Rachman¹, Mariana Destila Bayu Intan¹, Hikmah Thoha¹, Oksto Ridho Sianturi¹, Hanung Agus Mulyadi², Muawanah³, Estelle Masseret⁴

¹Pusat Penelitian Oseanografi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Jl. Pasir Putih 1 No. 1, Ancol Timur, Jakarta Utara, Indonesia

²Pusat Penelitian Laut Dalam, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Jl. Y. Syaranamual, Guru, Guru, Poka, Ambon, Maluku, Indonesia

³Balai Besar Perikanan Budidaya Laut Lampung, Jl. Yos Sudarso, Desa Hanura, Kec. Teluk Pandan, Kab. Pesawaran, Lampung, Indonesia

⁴MARBEC, University of Montpellier, IRD, Ifremer, CNRS, Montpellier, France

E-mail: arie027@lipi.go.id

Submitted 15 October 2020. Reviewed 25 November 2020. Accepted 11 January 2021.

DOI: [10.14203/oldi.2021.v6i1.337](https://doi.org/10.14203/oldi.2021.v6i1.337)

Abstrak

Marak Alga Berbahaya (MAB) akibat ledakan populasi *Pyrodinium bahamense* merupakan salah satu masalah di perairan pesisir Asia Tenggara, termasuk di Indonesia. Deposit kista (*Cyst bank*) yang terbentuk setelah terjadinya ledakan populasi *P. bahamense* berpotensi sebagai sumber ledakan populasi berikutnya. Oleh karena itu, pemetaan lokasi deposit kista *P. bahamense* di perairan-perairan pesisir Indonesia menjadi sangat penting dilakukan sebagai bagian dari usaha mitigasi terhadap dampak MAB yang diakibatkan oleh spesies dinoflagellata toksik tersebut. Kajian ini merupakan *desktop study*, yang mencakup studi literatur, penelusuran data penelitian terdahulu, serta analisis ulang sampel awetan dan sampel mentah (*raw sample*). Data dan sampel yang digunakan dalam kajian ini berasal dari penelitian terdahulu yang dilakukan di Teluk Lampung, Teluk Jakarta, pesisir Cirebon, dan Teluk Ambon. Dalam kajian ini, analisis untuk menentukan tingkat kerawanan terjadinya MAB *P. bahamense* di area-area kajian juga dilakukan berdasarkan data densitas dan distribusi kista *P. bahamense*. Hasil analisis menunjukkan densitas kista *P. bahamense* di Teluk Lampung dan Teluk Jakarta tergolong rendah (<50 kista.g⁻¹ sedimen basah). Sebaliknya, sedimen dasar perairan Teluk Ambon dan pesisir Cirebon tercatat densitas kista *P. bahamense* yang tinggi hingga mencapai >1.000 kista.g⁻¹ sedimen basah. Berdasarkan data tersebut, tingkat risiko terjadinya fenomena MAB *P. bahamense* di perairan Teluk Jakarta dan Teluk Lampung diketahui lebih rendah dibandingkan dengan Teluk Ambon dan pesisir Cirebon. Keberadaan deposit kista di semua perairan yang dikaji berpotensi menimbulkan ledakan populasi *P. Bahamense* di masa mendatang.

Kata kunci: Marak Alga Berbahaya, *cyst bank*, *Pyrodinium bahamense*, dinoflagellata toksik.

Abstract

Distribution and abundance of *Pyrodinium bahamense* cyst in the harmful algal blooms risk waters in Indonesia. *Pyrodinium bahamense* Harmful Algal Blooms (HABs) is one of the rising environmental problems in the coastal areas of Southeast Asia, particularly in Indonesia. Cyst bank formed

after the blooms of *P. bahamense* is a potential source for the future blooming events. Therefore, an effort to describe the distribution and abundance of *P. bahamense* cyst banks in Indonesian coastal waters is necessary as a part of the mitigation strategy against the negative impacts of those toxic dinoflagellate blooms. This study was done as a desk study, which included a literature study, reanalysed of previous research data, and reanalysed of preserved samples or stored raw samples. Data and samples used in this study were collected and analysed from part of past researches in Lampung Bay, Jakarta Bay, Cirebon coastal waters, and Ambon Bay. This study also included an analysis to determine the *P. Bahamense* HABs risk level in the studied areas based on the cyst density and distribution data. Results showed a low density of *P. bahamense* cyst in Lampung Bay and Jakarta Bay, with cyst density <50 cysts.g⁻¹ wet sediment. In contrast, the bottom sediments of Ambon Bay and Cirebon coastal waters contained high cyst density, which reached $>1,000$ cysts.g⁻¹ wet sediment. Based on those data, the *P. Bahamense* HABs risk in Jakarta Bay and Lampung Bay would be generally much lower compared to Ambon Bay and Cirebon waters. The existence of cyst banks in those coastal waters may indicate a possibility of future blooms of *P. bahamense*.

Keywords: Harmful Algal Blooms, cyst bank, *Pyrodinium bahamense*, toxic dinoflagellate.

Pendahuluan

Fenomena Marak Alga Berbahaya (MAB) yang diakibatkan oleh ledakan populasi spesies dinoflagellata beracun merupakan salah satu masalah besar yang mengancam kesehatan manusia, keseimbangan ekosistem, dan perekonomian masyarakat pesisir di beberapa perairan di Asia Tenggara (Furio et al., 2012). Kemunculan fenomena merugikan tersebut umumnya dipicu oleh eutrofikasi perairan sebagai akibat dari meningkatnya aktivitas manusia di pesisir, serta diperkuat oleh pengaruh dari pemanasan global (*global warming*) (Xiao et al., 2018). Eutrofikasi sendiri merupakan pengayaan kolom air oleh nutrien yang berasal dari daratan yang dapat menyebabkan munculnya kondisi hipoksia atau anoksia di kolom air, ledakan populasi fitoplankton berbahaya, kematian massal organisme laut lainnya (*mass mortality*), perubahan struktur komunitas biota air, degradasi kualitas lingkungan, dan berkurang atau hilangnya fungsi ekosistem perairan yang terdampak (Duarte et al., 2009; Kim et al., 2009; Xiao et al., 2018).

Salah satu spesies fitoplankton dari kelompok dinoflagellata berbahaya yang sering mengalami ledakan populasi (*blooming*) dan menyebabkan masalah di kawasan pesisir negara-negara Asia Tenggara adalah *Pyrodinium bahamense* (Mizushima et al., 2007; Usup et al., 2012). *P. bahamense* sendiri merupakan jenis dinoflagellata yang umum ditemukan di perairan tropis kawasan Pasifik dan mampu menghasilkan beberapa jenis senyawa racun penyebab penyakit *paralytic shellfish poisoning* (PSP) seperti *saxitoxin* (STX), *neosaxitoxin* (NEO), *decarbamoysaxitoxin* (dcSTX), *gonyautoxin 4* (GTX4), dan *gonyautoxin 5* (GTX5) yang dapat

berakibat fatal bagi manusia (Usup et al., 2012; Usup et al., 1994). Spesies *P. bahamense* juga merupakan jenis dinoflagellata toksik penyumbang kasus PSP terbesar di dunia selama periode tahun 1989-1999 (Furio et al., 2012). Pada beberapa negara Asia Tenggara seperti Malaysia, Filipina, Brunei Darussalam, dan Indonesia, jumlah total kasus kematian akibat mengkonsumsi biota laut, terutama kerang, yang tercemar oleh toksin *P. bahamense* telah mencapai angka ratusan orang (Azanza & Taylor, 2001; Usup et al., 2012; Usup et al., 1994). Oleh karena itu, dinamika fenomena MAB oleh *P. bahamense*, serta berbagai karakter fisiologis dan biologisnya telah menjadi perhatian banyak peneliti di dunia (Usup et al., 1994; Usup et al., 2012).

Di Indonesia, fenomena MAB yang diakibatkan oleh *P. bahamense* telah tercatat dan mengakibatkan jatuhnya puluhan korban jiwa di beberapa perairan pesisir, seperti Teluk Ambon, Teluk Kao, Pulau Seram, perairan Papua, dan pesisir Cirebon (Likumahua, 2015; Nurlina & Liambo, 2018; Wiadnyana & Sidabutar, 1997; Wiadnyana et al., 1996). Selain itu, kerugian ekonomi akibat MAB *P. bahamense* juga sangat besar, hingga dapat mencapai > 300.000 USD per hari pada salah satu kasus ledakan populasi *P. bahamense* terbesar di Teluk Manila, Filipina yang terjadi pada bulan Agustus dan September 1988 (Azanza & Taylor, 2001; Corrales & Maclean, 1995).

Salah satu karakter unik dari *P. bahamense* adalah kemampuannya untuk menghasilkan kista dorman (*resting cyst*) sebagai strategi adaptasi terhadap kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan (Anderson, 1989; Rhodora & Taylor, 2001; Genovesi-Giunti & Vaquer, 2006), serta sebagai strategi untuk memastikan

redominasi spesies saat *blooming*, dan strategi penyebaran spesies (*species dispersal*) (Satta et al., 2013). Kista dinoflagellata umumnya tersusun atas senyawa organik kompleks dan 'berat' yang menyerupai senyawa sporopollenin pada serbuk sari (*pollen*) tanaman, sehingga kista sangat tahan terhadap tekanan fisik, kimia, atau biologis (Kim et al., 2009). Karena berat jenis dan karakter hidro dinamikanya, kista dinoflagellata akan terbawa arus, lalu tersimpan dan terakumulasi di dasar perairan bersama partikel sedimen halus, terutama lanau (*silt*) dan lempung (*clay*), hingga membentuk deposit kista, atau *cyst bank* (Brosnahan et al., 2020; Villanoy et al., 2006).

Cyst bank, *cyst bed*, atau deposit kista *P. bahamense* dalam kajian ini merupakan area yang memiliki densitas kista spesies sangat tinggi pada sedimen, serta diketahui dapat menjadi lokasi awal mula munculnya fenomena Marak Alga Berbahaya (MAB) di suatu perairan (Anderson, 1989; Azanza et al., 2004; Brosnahan et al., 2020; Genovesi-Giunti et al., 2006; Siringan et al., 2008; Villanoy et al., 2006). Deposit kista juga berfungsi menyuplai sel planktonik ketika ledakan populasi *P. bahamense* terjadi, serta menjadi tempat penyimpanan (*reservoir*) keanekaragaman genetik spesies tersebut sebagai strategi menghadapi perubahan kondisi lingkungan di masa depan (Brosnahan et al., 2020). Kista *P. Bahamense* pada lapisan atas sedimen (*surface sediment*) menjadi sumber MAB di beberapa perairan Pasifik dan di pesisir Filipina, diketahui memiliki masa dormansi berkisar antara 2,5 - 3,5 bulan sejak kista terdeposit ke dasar perairan, dan akan segera mengalami germinasi apabila kondisi perairan menguntungkan bagi kehidupannya (Azanza et al., 2004; Brosnahan et al., 2020). Bila kondisi perairan tidak mendukung, kista *P. bahamense* dapat mengalami masa dormansi yang sangat panjang hingga terjadi resuspensi sedimen tersebut ke kolom air. Sebagai contoh, kista *P. bahamense* telah terdeteksi di sedimen Teluk Manila, Filipina, sejak tahun 1920, namun ledakan populasi spesies *P. bahamense* baru muncul pertama kali pada 1988 dan diketahui bukan akibat dari introduksi kista yang terbawa bersama air *ballast* kapal (Siringan et al., 2008). Deposit kista dinoflagellata pada sedimen dasar perairan juga menyimpan informasi penting mengenai sejarah eutrofikasi di perairan, dinamika temporal komunitas fitoplankton, dan durasi serta frekuensi kejadian MAB di masa lalu (Dale et al., 1999; Kim et al., 2009).

Kajian ini difokuskan pada empat wilayah pesisir Indonesia yang diketahui mengalami

tekanan antropogenik tinggi atau telah tercatat pernah mengalami fenomena MAB *P. bahamense*, yaitu Teluk Jakarta, Teluk Lampung, Teluk Ambon, dan Pesisir Cirebon. Teluk Jakarta, merupakan salah satu perairan teluk dengan tingkat pencemaran nutrien yang sangat tinggi di dunia dan dikategorikan dalam kelas perairan dengan tingkat eutrofikasi tinggi (*highly-eutrophic water*) (Damar et al., 2019; Usup et al., 1994), serta diketahui sering mengalami ledakan populasi fitoplankton merugikan (Praseno et al., 2003). Serupa dengan Teluk Jakarta, Teluk Lampung juga termasuk perairan yang mengalami tekanan antropogenik dan pengayaan nutrien (eutrofikasi), terutama akibat kegiatan pertanian di pesisir (Damar et al., 2012). Teluk Lampung juga diketahui tengah mengalami masalah serius akibat ledakan populasi spesies dinoflagellata berbahaya, yaitu *Margalefudinium polykrikoides*, yang pertama kali muncul pada 2012 (Thoha et al., 2019). Serupa dengan Teluk Lampung dan Teluk Jakarta, Teluk Ambon juga diketahui memiliki masalah dengan ledakan populasi dinoflagellata berbahaya, salah satunya adalah *P. bahamense*, yang juga telah mengakibatkan beberapa kali kasus PSP yang berakhir pada kematian penderitanya (Likumahua, 2015; Wiadnyana et al., 1996). Sementara itu, perairan pesisir Cirebon diketahui juga mengalami masalah akibat MAB *P. bahamense* yang berakibat pada terjadinya Kejadian Luar Biasa (KLB) PSP pada 2016 yang telah mengakibatkan 115 orang dirawat di rumah sakit dan dua orang meninggal dunia (Nurlina & Liambo, 2018).

Fenomena ledakan populasi *P. Bahamense* serta kasus keracunan dan kematian akibat PSP telah dilaporkan di beberapa wilayah di Indonesia. Hal ini mendorong dilakukannya kajian mengenai deposit kista spesies tersebut di perairan pesisir Indonesia. Kajian ini bertujuan untuk memetakan lokasi deposit kista *P. bahamense* di perairan-perairan pesisir Indonesia yang diketahui pernah mengalami fenomena MAB yang diakibatkan oleh ledakan populasi *P. bahamense*. Selanjutnya, informasi mengenai lokasi dan besar deposit kista *P. bahamense* di dasar perairan akan dipergunakan untuk membuat peta tingkat resiko atau tingkat kerawanan terhadap fenomena MAB yang diakibatkan oleh spesies dinoflagellata toksik tersebut. Peta tingkat resiko tersebut diharapkan dapat dimanfaatkan untuk mempelajari potensi dan sumber ledakan populasi *P. bahamense* di masa depan, serta berkontribusi sebagai dasar informasi untuk menyusun strategi

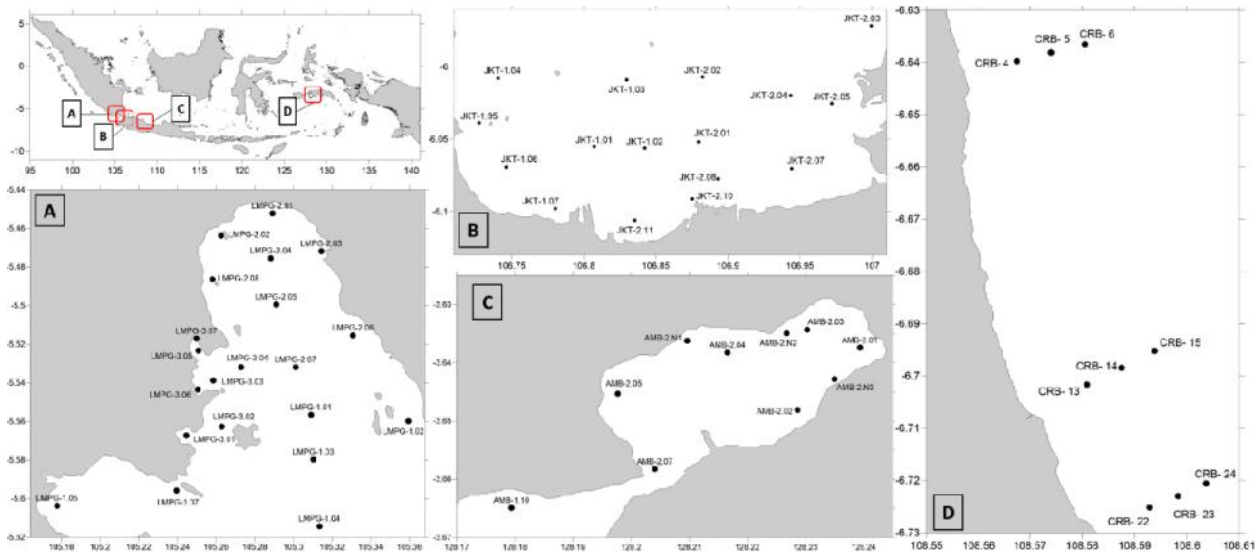
mitigasi terhadap dampak negatif yang ditimbulkan fenomena MAB tersebut.

Metodologi

Koleksi Data dan Analisis Ulang Sampel

Kajian ini merupakan kombinasi antara *desktop study*, yang mencakup studi pustaka, penelusuran data penelitian terdahulu, serta analisis ulang sampel, baik awetan maupun sampel mentahan (*raw sample*). Sampel sedimen, kista, dan data yang digunakan dalam kajian ini adalah milik Laboratorium Plankton, Pusat Penelitian Oseanografi, Lembaga Ilmu

Pengetahuan Indonesia (P2O-LIPI). Dalam kajian ini, data dan sampel yang dipergunakan berasal dari penelitian yang telah dilakukan di perairan Teluk Lampung (2014), Teluk Ambon (2014), Teluk Jakarta (2014), dan pesisir Cirebon (2017) (Gambar 1). Sebagian data dari penelitian terkait kista dinoflagellata atau fenomena Marak Alga Berbahaya (MAB) di Teluk Lampung dan Pesisir Cirebon yang dipergunakan dalam penelitian ini telah dipublikasikan oleh Sidabutar et al. (2016), Thoha et al. (2019), dan Rachman et al. (2019) (Tabel 1).



Gambar 1. Peta lokasi kajian dan distribusi stasiun pengambilan sampel di (A) Teluk Lampung, 2014; (B) Teluk Jakarta, 2014; (C) Teluk Ambon, 2014; dan (D) pesisir Cirebon, 2017.

Figure 1. The map of study areas and the distribution of sampling stations in (A) Lampung Bay, 2014; (B) Jakarta Bay, 2014; (C) Ambon Bay, 2014; and (D) coastal area of Cirebon, 2017.

Tabel 1. Keterangan lokasi penelitian, tanggal pengambilan sampel, jumlah sampel, dan publikasi terdahulu yang dipergunakan dalam kajian ini.

Table 1. Information on the research area, date of sample collection, number of samples, and previous publications that were used in this study.

Province	Study Sites	Date of Sample Collection	Number of Samples	Publication
West Java	Cirebon Coast	26 to 27 April 2017	9	Rachman et al. (2019)
DKI Jakarta	Jakarta Bay	21 to 22 May 2014	16	Sidabutar et al. (2016)
Lampung	Lampung Bay	13 to 15 May 2014	21	Sidabutar et al. (2016); Thoha et al. (2019)
Maluku	Ambon Bay	14 to 15 October 2014	10	Sidabutar et al. (2016)

Teknik Sampling dan Analisis Sampel Kista

Pada kajian ini, sampel-sampel kista *Pyrodinium bahamense* yang dianalisis ulang merupakan hasil ekstraksi kista dari sedimen dasar laut yang diambil dengan menggunakan Ekman Grab pada penelitian-penelitian terdahulu (Tabel 1). Sampel sedimen yang telah dikoleksi tersebut disimpan tanpa melalui proses pengawetan (fiksasi) dalam kotak plastik tersegel dan disimpan dalam lemari pendingin pada suhu 4°C. Proses ekstraksi kista *P. bahamense* dilakukan menggunakan metode *gradient density cyst separation* (pemisahan kista berdasarkan perbedaan densitas) menurut Mizushima et al. (2007), Blanco (1986), dan Genovesi et al. (2009).

Kista yang telah diekstraksi kemudian diidentifikasi dan dienumerasi menggunakan *phase-contrast inverted microscope* Nikon Diaphot pada perbesaran antara 100-400X. Enumerasi kista *P. bahamense* dilakukan dengan modifikasi metode analisis fraksi sampel (*sample fraction*) menggunakan *Sedgewick Rafter Counting Chamber* (SRCC) LeGresley & McDermott (2010), sedangkan identifikasi kista *P. bahamense* dilakukan berdasarkan karakter morfologi dan morfometri kista menurut Matsuoka (1989), Matsuoka et al. (1999), dan Morquecho et al. (2014). Sebagai catatan, semua sampel kista yang dikoleksi dalam penelitian terdahulu dari perairan Teluk Lampung (2014), Teluk Ambon (2014), Teluk Jakarta (2014 dan

2019), dan pesisir Cirebon (2017) telah melalui proses ekstraksi, enumerasi, dan identifikasi yang sama.

Selain itu, dilakukan pula pengambilan foto resolusi tinggi dengan menggunakan kamera DSLR Canon 500D dan 750D yang terpasang di mikroskop Nikon Diaphot untuk keperluan analisis lebih lanjut untuk morfometri dan morfologi kista *P. bahamense*. Foto yang telah diambil kemudian diproses lebih lanjut (*post-processing*) dengan menggunakan program Zeiss AxioVision SE64 ver. 4.9.1 yang sudah dikalibrasi untuk keperluan analisis morfometri kista *P. bahamense*.

Analisis Data

Dalam kajian ini, distribusi kista pada perairan-perairan kajian ditunjukkan dengan peta kontur yang dibuat dengan menggunakan metode *Kriging Gridding* (Yang et al., 2004) menggunakan software Surfer Ver. 10 Surface Mapping System. Untuk menunjukkan besar deposit kista *P. bahamense* di dasar perairan, digunakan *bubble plot* yang ditambahkan pada peta kontur dengan perhitungan *square root scaling* terhadap ukuran simbol titik *sampling*. *Square root scaling* digunakan karena adanya rentang nilai data yang sangat tinggi di data densitas kista *P. bahamense* dalam kajian ini.

Tabel 2. Kelas atau kategori dan nilai tingkat resiko terjadinya MAB di sebuah perairan berdasarkan densitas absolut dari kista dinoflagellata yang ada di sedimen dasar perairan. Nilai tingkat resiko MAB dibuat berdasarkan tingkatan kelas/kategori (McMinn, 1991; Tian et al., 2018).

Table 2. Classes or categories and risk value for the Harmful Algal Blooms (HABs) in the waters based on the absolute density of dinoflagellate cysts in the sediments. The risk value of HABs were created based on the class or category level (McMinn, 1991; Tian et al., 2018).

Cyst density*	Density Class/Category*	HABs Risk Value
<10 cyst.g ⁻¹	Very Low	1
10-100 cyst.g-1	Low	2
100-1000 cyst.g-1	Moderate	3
1000-10.000 cyst.g-1	High	4
>10.000 cyst.g-1	Very High	5

Selain itu, kajian ini juga menggunakan pembagian kelas suatu area berdasarkan densitas kista dinoflagellata pada sedimen (Tabel 2). Kelas-kelas tersebut kemudian dikonversi menjadi nilai tingkat resiko atau potensi terjadinya Marak Alga Berbahaya (MAB) *P. bahamense* di

perairan, dengan rentang nilai mulai dari 1 (resiko terendah) hingga 5 (resiko tertinggi) (Tabel 2). Pemberian nilai tingkat resiko tersebut dilakukan dengan asumsi bahwa stasiun atau wilayah dengan deposit kista dinoflagellata yang semakin besar pada sedimen dasar perairan memiliki resiko

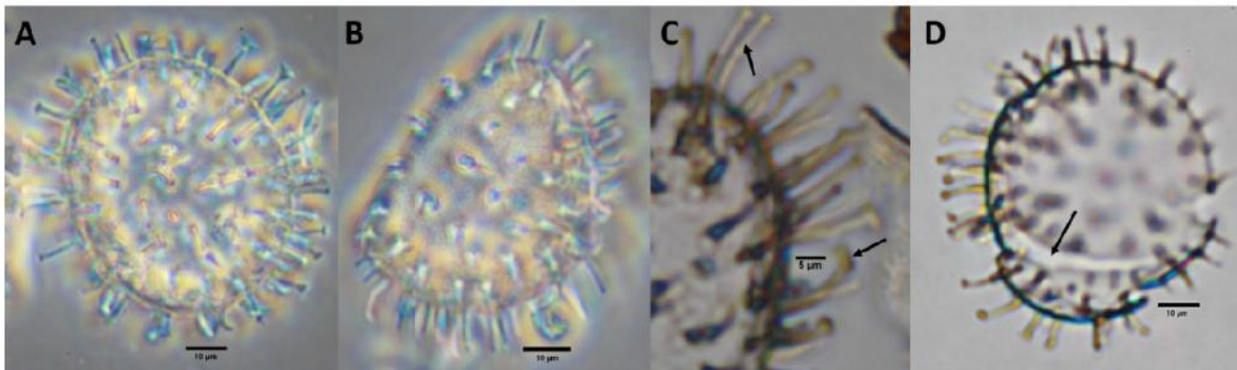
mengalami MAB yang semakin besar pula. Nilai tingkat resiko selanjutnya digunakan sebagai dasar pembuatan peta kontur resiko MAB *P. bahamense* di masing-masing area kajian dengan metode *Kriging Gridding* menggunakan program Surfer Ver. 10.

Hasil

Deskripsi morfologi dan morfometri kista *Pyrodinium bahamense*

Di bawah mikroskop cahaya, kista dinoflagellata *P. bahamense* memiliki ciri khas berupa bentuk kista yang membulat (*spherical*) dengan dinding sel ganda yang umumnya transparan, serta memiliki struktur mirip duri (*spine/processes*) yang tersusun padat di seluruh

permukaan kista (Gambar 2A). Duri (*processes*) pada kista *P. bahamense* umumnya memiliki bentuk silindris atau tabung (*cylindrical/tubiform*) berongga (*hollow*) dengan ujung tumpul (*patulate*) (Gambar 2c). Pangkal dari duri kista *P. bahamense* melebar dan membentuk pola seperti segitiga (Gambar 2c). Pada kista yang masih hidup, seringkali ditemukan kumpulan sitoplasma (*accumulated body*) yang menyebabkan kista tampak gelap di bawah mikroskop *brightfield*. Umumnya inti sel (*nucleus*) tidak dapat terlihat. Rekahan atau sobekan kista (*archeophyle*), yang merupakan lokasi keluarnya sel *P. bahamense* saat germinasi, umumnya berbentuk mirip bulan sabit (Gambar 2d).



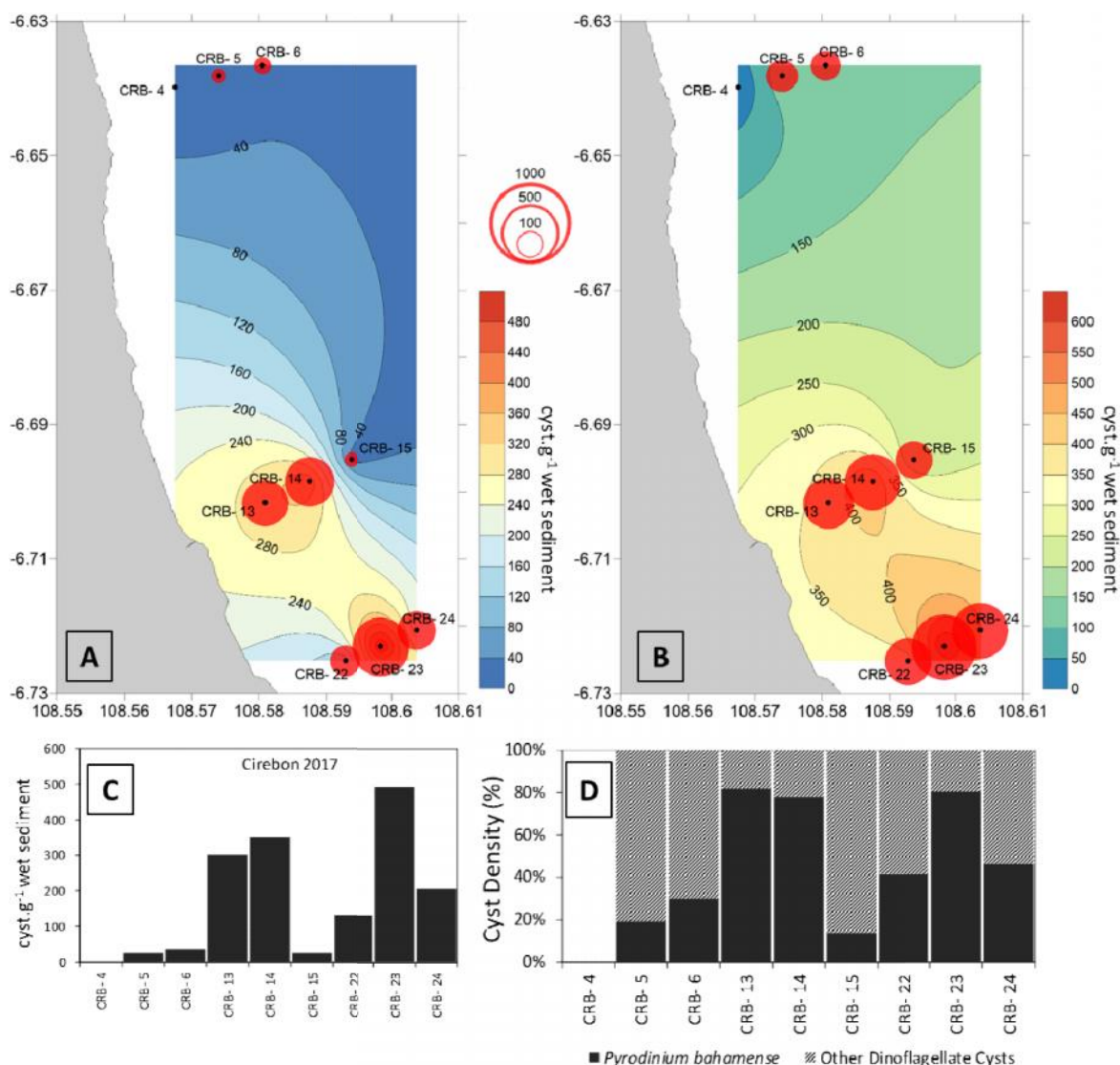
Gambar 2. Foto kista *P. bahamense* (A) kista utuh, namun sudah kosong; (B) kista yang rusak; (C) duri (*processes*) yang berbentuk silindris dan berongga, dengan ujung tumpul; dan (D) rekahan kista (*archeophyle*) yang terbentuk setelah sel mengalami germinasi.

Figure 2. Photographs of *P. bahamense* cyst (A) whole cyst, without cytoplasm; (B) damaged or fragmented cyst; (C) hollow cylindrical cyst's processes, with patulate end; and (D) archeophyle, which formed after the cell has germinated.

Distribusi spasial deposit kista *P. bahamense* di Cirebon tahun 2017

Data kista di perairan Cirebon pada 2017 menunjukkan bahwa densitas kista *P. bahamense* diketahui berkisar antara 0 - 493 kista.g⁻¹ sedimen basah (Gambar 3C). Densitas *P. bahamense* berkontribusi hingga >80% dari total densitas kista dinoflagellata yang ditemukan di dasar perairan Cirebon (Gambar 3D). Densitas kista *P. bahamense* ditemukan lebih tinggi di kawasan selatan dari area kajian pada 2017 tersebut (Gambar 3A), yang merupakan lokasi berada

dekat kawasan perkotaan yang padat penduduk. Stasiun CRB-23 diketahui memiliki densitas kista *P. bahamense* tertinggi (Gambar 3A), sehingga merupakan lokasi deposit kista utama yang ditemukan pada penelitian di perairan pesisir Cirebon tersebut. Lokasi yang sama juga merupakan pusat deposit kista dinoflagellata selain dari kista spesies *P. bahamense* (Gambar 3B). Sementara itu, stasiun CRB-4 merupakan area unik yang tidak memiliki deposit kista, baik *P. bahamense* atau pun kista dinoflagellata lainnya (Gambar 3).



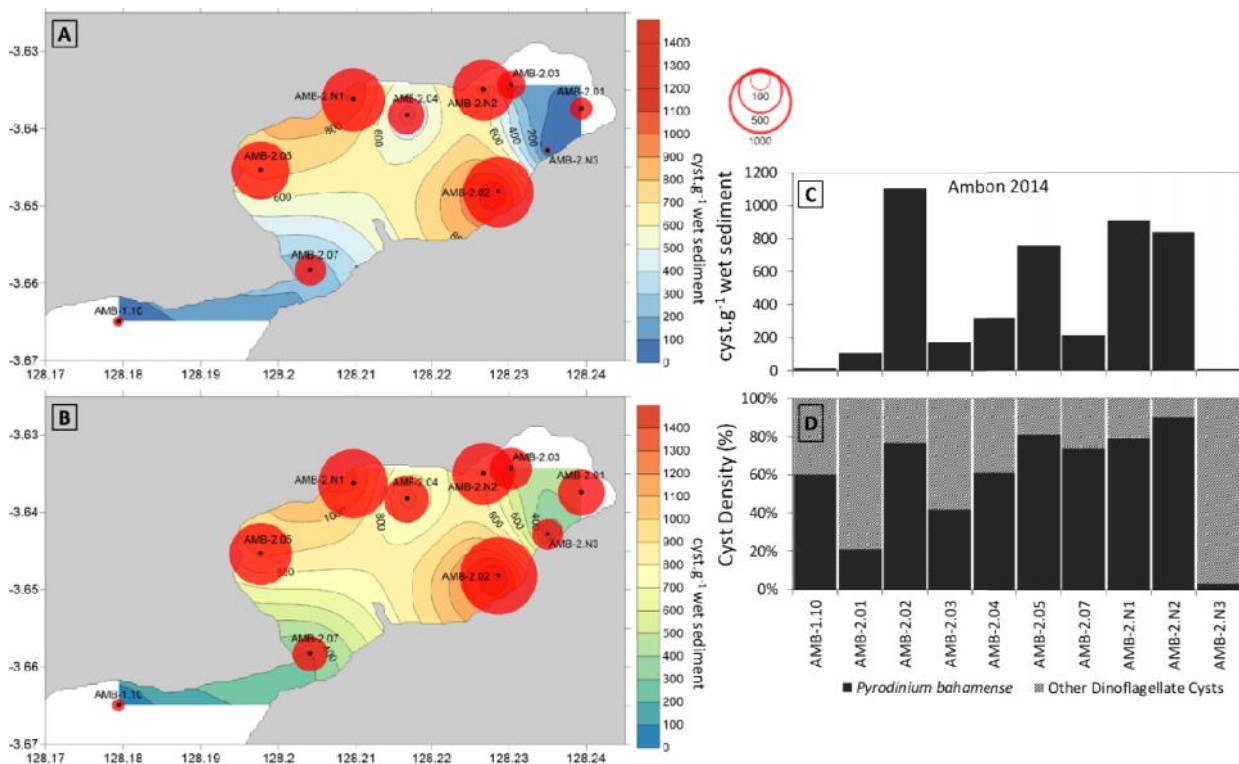
Gambar 3. Distribusi spasial (A) kista *P. bahamense*; (B) total deposit kista dinoflagellata; (C) densitas kista *P. bahamense*; dan (D) densitas relatif kista *P. bahamense* terhadap total kista dinoflagellata di perairan pesisir Cirebon di tahun 2017. Lingkaran merah pada peta menunjukkan besar deposit kista di sedimen dasar perairan.

Figure 3. Spatial distribution of (A) *P. bahamense* cyst density; (B) total dinoflagellate cyst deposit; (C) dinoflagellate cyst density; and (D) relative density of *P. bahamense* cyst in the Cirebon coastal waters in 2017. Red bubbles on the map represent the size of cyst deposit in the sediment.

Distribusi spasial deposit kista *P. bahamense* di Teluk Ambon tahun 2014

Kista *P. bahamense* pada penelitian di Teluk Ambon pada 2014 ditemukan di seluruh stasiun pengambilan sampel (Gambar 4A). Densitas kista *P. bahamense* di sedimen dasar Teluk Ambon pada penelitian pada saat itu berkisar antara 7 - 1,107 kista.g⁻¹ sedimen basah (Gambar 4C), dengan deposit kista terbesar ditemukan pada stasiun AMB-2.02 (Gambar 4C). Densitas kista terendah ditemukan di dua stasiun, yaitu AMB-2.N3 yang berada di Teluk Ambon dalam dan AMB-1.01 yang berada di Teluk

Ambon luar (Gambar 4C). Di Teluk Ambon, densitas relatif kista *P. bahamense* berkontribusi hingga >90% dari total densitas kista dinoflagellata pada sedimen perairan (Gambar 4D). Terkecuali di stasiun AMB-2.N3, kista *P. bahamense* berkontribusi sebesar <10% dari total densitas kista dinoflagellata yang ditemukan pada sedimen dasar perairan (Gambar 4D). Sebagai catatan, densitas kista dinoflagellata yang ditemukan pada sedimen dasar perairan Teluk Ambon 2014 merupakan yang terbesar pada kajian ini, dengan densitas kista mencapai 1.440 kista.g⁻¹ sedimen basah (Gambar 4B).



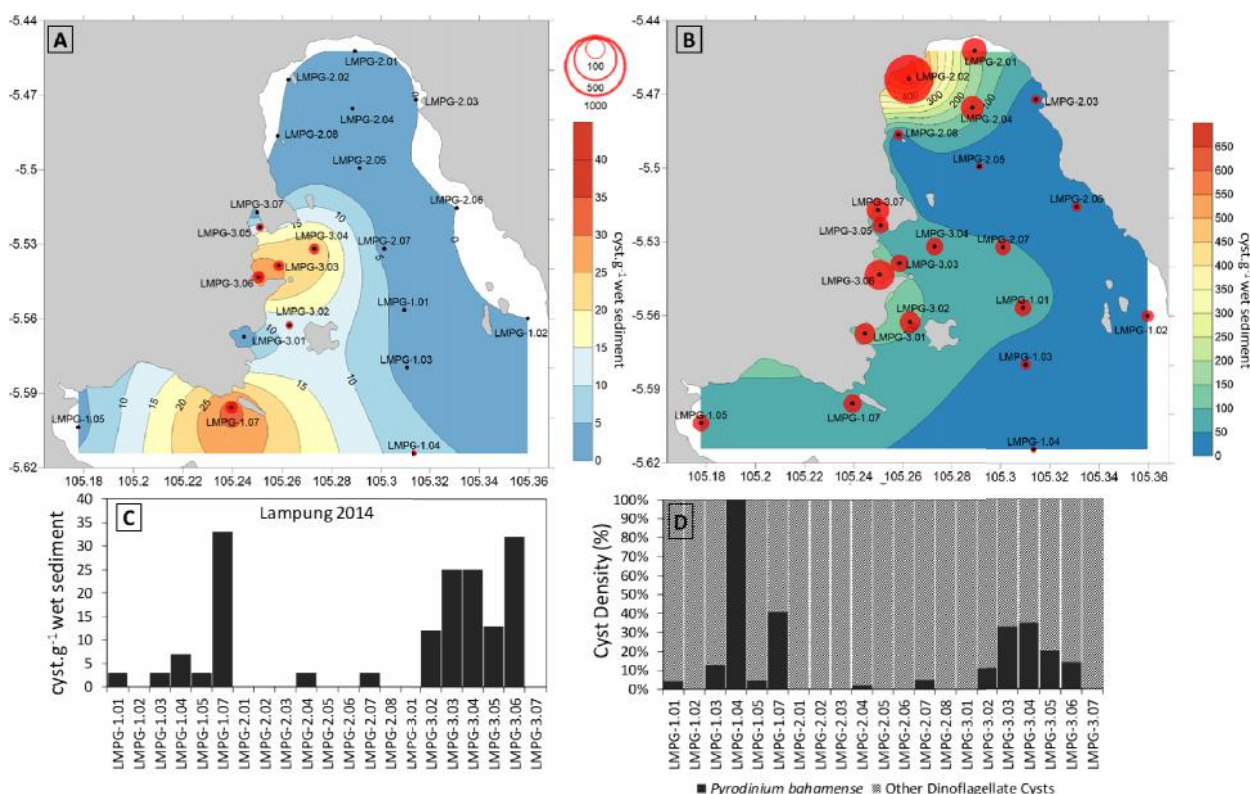
Gambar 4. Distribusi spasial (A) kista *P. bahamense*; (B) total deposit kista dinoflagellata; (C) densitas kista *P. bahamense*; dan (D) densitas relatif kista *P. bahamense* terhadap total kista dinoflagellata di perairan Teluk Ambon pada tahun 2014. Lingkaran merah pada peta menunjukkan besar deposit kista di sedimen dasar perairan.

Figure 4. Spatial distribution of (A) *P. bahamense* cyst density; (B) total dinoflagellate cyst deposit; (C) dinoflagellate cyst density; and (D) relative density of *P. bahamense* cyst in Ambon Bay in 2014. Red bubbles on the map represent the size of cyst deposit in the sediment.

Distribusi spasial deposit kista *P. bahamense* di Teluk Lampung

Data penelitian menunjukkan densitas *P. bahamense* yang rendah di sedimen dasar perairan Teluk Lampung pada 2014 (Gambar 5C). Berbeda dengan yang ditemukan di Teluk Ambon dan pesisir Cirebon, densitas kista *P. bahamense* di dasar Teluk Lampung hanya berkisar antara 0 - 37 kista.g⁻¹ sedimen basah (Gambar 5C). Berdasarkan peta kontur (Gambar 5A), deposit kista *P. bahamense* di Teluk Lampung sebagian besar berada di sisi barat daya dan terletak jauh dari kota Lampung yang berada di utara teluk. Selain itu, dari 21 stasiun penelitian, kista *P.*

Bahamense hanya ditemukan di 12 stasiun saja dengan densitas kista tertinggi ditemukan di stasiun LMPG-1.07 (Gambar 5A). Di stasiun tersebut, kista *P. bahamense* berkontribusi hingga >90% dari total densitas kista dinoflagellata yang ditemukan pada sedimen dasar perairan (Gambar 5D). Pola distribusi kista *P. bahamense* di Teluk Lampung terlihat sangat berbeda dengan pola distribusi kista dinoflagellata lainnya (Gambar 5A&B). Jika deposit kista *P. bahamense* terbesar berada jauh dari kota Lampung yang terletak di utara teluk (Gambar 5A), maka deposit kista dinoflagellata lainnya paling besar berada tepat di depan kota padat penduduk tersebut (Gambar 5B).



Gambar 5. Distribusi spasial (A) kista *P. bahamense*, (B) total deposit kista dinoflagellata, (C) densitas kista *P. bahamense*, dan (D) densitas relatif kista *P. bahamense* terhadap total kista dinoflagellata di perairan Teluk Lampung di tahun 2014. Lingkaran merah pada peta menunjukkan besar deposit kista di sedimen dasar perairan.

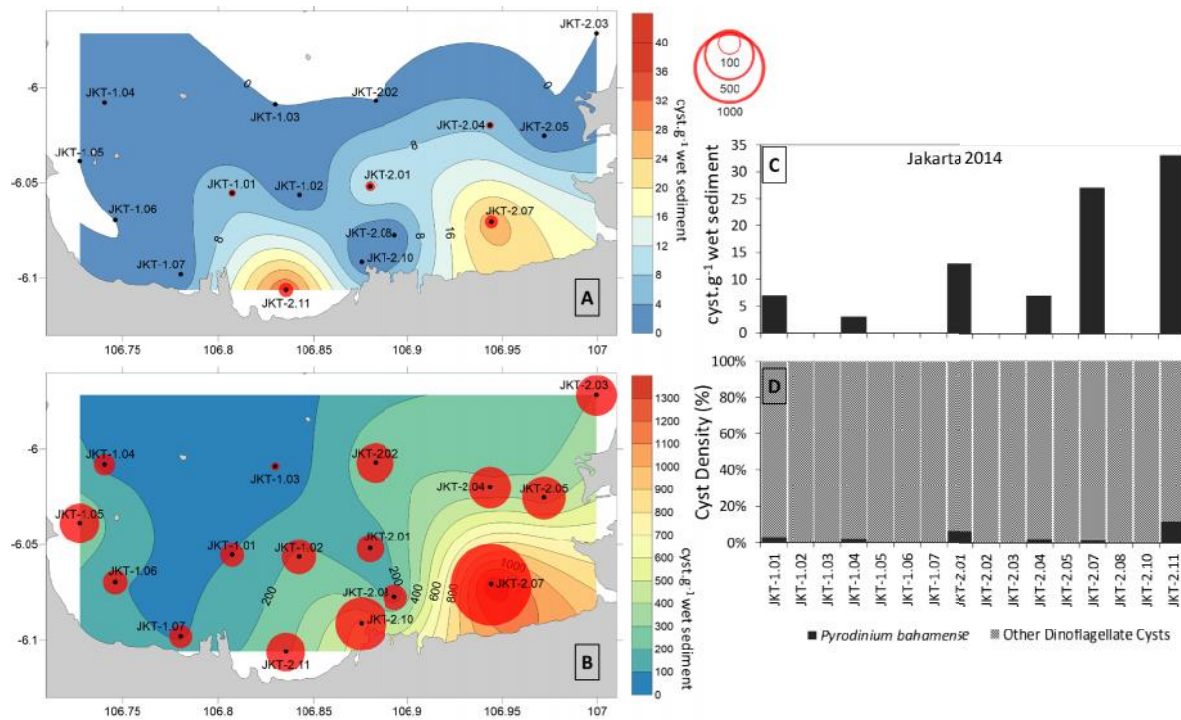
Figure 5. Spatial distribution of (A) *P. bahamense* cyst density, (B) total dinoflagellate cyst deposit, (C) dinoflagellate cyst density, and (D) relative density of *P. bahamense* cyst in Lampung Bay in 2014. Red bubbles on the map represent the size of cyst deposit in the sediment.

Distribusi spasial deposit kista *P. bahamense* di Teluk Jakarta

Serupa dengan Teluk Lampung, besar deposit kista *P. bahamense* pada sedimen dasar perairan juga tergolong rendah, yaitu dengan densitas kista sebesar 0 - 33 kista.g⁻¹ sedimen basah (Gambar 6A & Gambar 6C). Densitas relatif kista *P. bahamense* hanya berkontribusi <12% dari total densitas kista dinoflagellata yang ditemukan pada sedimen dasar perairan Teluk Jakarta pada penelitian yang dilakukan pada 2014 (Gambar 6D). Meskipun demikian, salah satu pusat deposit kista *P. bahamense* di perairan Teluk Jakarta pada 2014 (Gambar 6D) berada di area dengan densitas kista dinoflagellata terbesar di perairan tersebut, yaitu di stasiun JKT-2.07 (Gambar 6B). Selain itu, deposit kista *P. bahamense* terbesar di Teluk Jakarta juga ditemukan di stasiun JKT-2.07 (Gambar 6A).

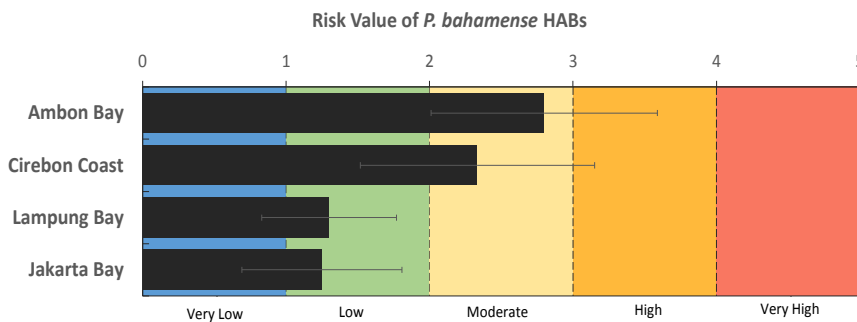
Peta Zona Rawan Ledakan Populasi *P. bahamense* di Beberapa Perairan

Dari empat teluk yang dikaji (Teluk Jakarta, Teluk Lampung, Teluk Ambon, dan Pesisir Cirebon), secara umum diketahui bahwa resiko terjadinya ledakan populasi *P. bahamense* di Teluk Lampung dan Teluk Jakarta lebih rendah dibandingkan dengan di Teluk Ambon dan perairan pesisir Cirebon (Gambar 7). Berdasarkan hasil analisis, Teluk Lampung dan Teluk Jakarta diketahui memiliki tingkat resiko yang rendah, sedangkan Teluk Ambon dan pesisir Cirebon memiliki tingkat resiko menengah hingga tinggi terhadap kemunculan ledakan populasi *P. bahamense* di perairannya (Gambar 7). Sebagai catatan, peta zona risiko terhadap ledakan populasi *P. bahamense* di area-area kajian (Gambar 8) dibuat berdasarkan klasifikasi kelas densitas dan skala resiko atau potensi terjadinya MAB di perairan (Tabel 2).



Gambar 6. Distribusi spasial (A) kista *P. bahamense*; (B) total deposit kista dinoflagellata; (C) densitas kista *P. bahamense*; dan (D) densitas relatif kista *P. bahamense* terhadap total kista dinoflagellata di perairan Teluk Jakarta pada tahun 2014. Lingkaran merah pada peta menunjukkan besar deposit kista di sedimen dasar perairan.

Figure 6. Spatial distribution of (A) *P. bahamense* cyst density; (B) total dinoflagellate cyst deposit; (C) dinoflagellate cyst density; and (D) relative density of *P. bahamense* cyst in Jakarta Bay in 2014. Red bubbles on the map represent the size of cyst deposit in the sediment.



Gambar 7. Rerata tingkat resiko atau potensi terjadinya Marak Alga Berbahaya (MAB) yang diakibatkan oleh ledakan populasi *P. bahamense* di perairan kajian.

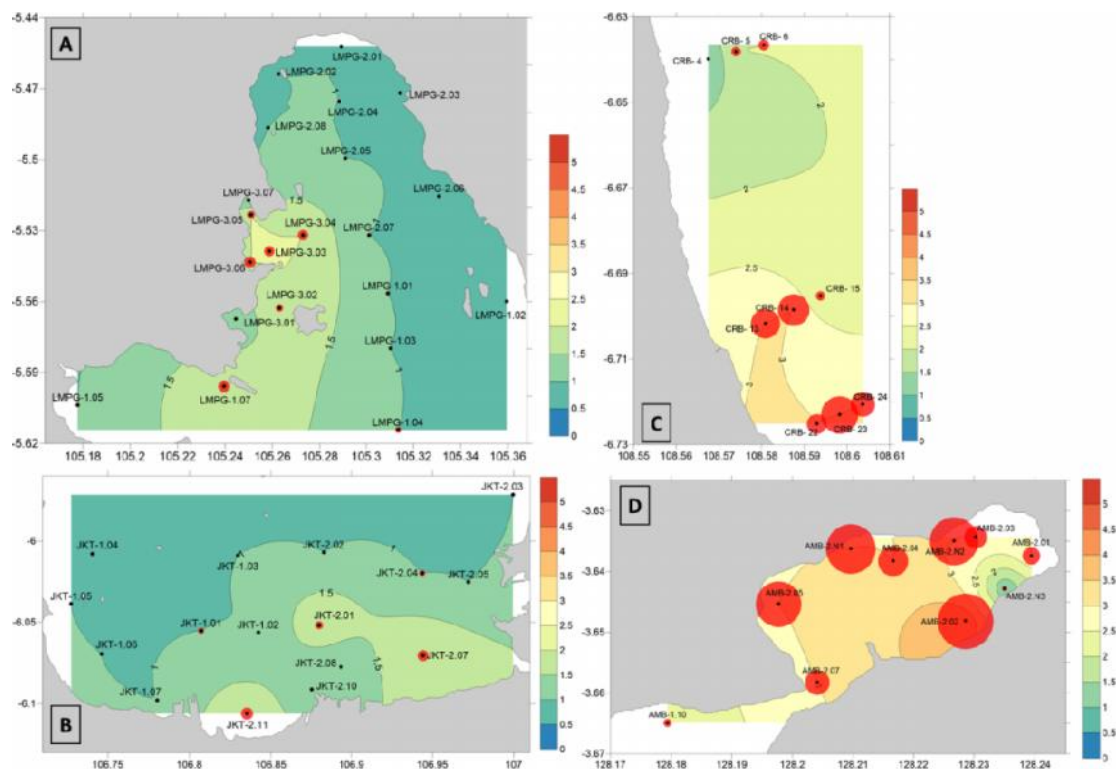
Figure 7. The average risk values of harmful algal blooms (HABs) caused by blooming *P. bahamense* in the study areas.

Meskipun masih tergolong memiliki resiko MAB *P. bahamense* yang rendah (Tingkat Risiko 2), area yang paling rentan untuk menjadi area terdampak atau menjadi sumber sel planktonik dinoflagellata berada di area Teluk Hurun yang berada di sisi barat Teluk Lampung dan berada di kawasan Desa Hanura (Gambar 8A). Di area tersebut, terdapat tiga stasiun penelitian (LMPG-

3.06, LMPG-3.03, LMPG-3.04) dengan densitas *P. bahamense* yang tinggi dibandingkan dengan stasiun lain pada kajian pada 2014 (Gambar 5A dan 5C). Meskipun demikian deposit kista *P. bahamense* terbesar di Teluk Lampung pada 2014 diketahui berada di stasiun LMPG-1.07 (Gambar 5A), sehingga area tersebut termasuk area yang perlu diwaspadai sebagai salah satu sumber kista

P. bahamense di perairan Teluk Lampung. Serupa dengan Teluk Lampung, Teluk Jakarta secara umum juga memiliki tingkat risiko MAB *P. bahamense* yang sangat rendah hingga rendah (Gambar 8B). Dua area yang perlu diwaspadai

sebagai sumber sel planktonik *P. bahamense* bila terjadi ledakan populasi spesies itu berada di area di dekat pesisir Ancol dan Jakarta Utara (JKT-2.11) dan di utara pesisir Cilincing (Jakarta Utara) dan Marunda (Bekasi Utara) (Gambar 8B).



Gambar 8. Peta kontur yang menunjukkan zona pembagian tingkat risiko kejadian MAB yang diakibatkan oleh *P. bahamense* di perairan (A) Teluk Lampung; (B) Teluk Jakarta; (C) Pesisir Cirebon, dan (D) Teluk Ambon.

Figure 8. Contour map showing the zonation based on the HABs risk level caused by *P. bahamense* in (A) Lampung Bay, (B) Jakarta Bay, (C) Cirebon coastal water, and (D) Ambon Bay.

Berbeda dengan Teluk Lampung (2014) dan Teluk Jakarta (2014), tingkat risiko kejadian MAB akibat ledakan populasi *P. bahamense* di perairan Cirebon (2017) dan Teluk Ambon (2014) secara umum jauh lebih tinggi (Gambar 8C & 8D). Beberapa area di kedua perairan tersebut memiliki tingkat risiko menengah hingga tinggi untuk menjadi sumber atau pun terdampak oleh MAB *P. bahamense*. Di perairan pesisir Cirebon pada 2017, terlihat jelas bahwa area dengan tingkat risiko menengah (Tingkat Risiko 3) berada di daerah selatan area kajian (Gambar 8C). Sedikit berbeda dengan Teluk Lampung, tingkat risiko MAB *P. bahamense* di Teluk Ambon berkisar antara kategori rendah (Nilai Risiko 2) hingga tinggi (Nilai Risiko 4) (Gambar 8D). Namun dapat terlihat pada peta kontur (Gambar 8D), sebagian besar area di Teluk Ambon dalam pada

penelitian di tahun 2014 memiliki tingkat risiko menengah (Nilai Risiko 3).

Pembahasan

Distribusi kista *P. bahamense* di dasar perairan Teluk Lampung, Teluk Jakarta, Teluk Ambon, dan Pesisir Cirebon

Peta kontur distribusi kista *P. bahamense* di sedimen dasar perairan menunjukkan pola distribusi yang unik pada keempat area kajian dalam penelitian ini. Namun, secara umum densitas kista *P. bahamense* di dasar perairan Teluk Lampung (2014) dan Teluk Jakarta (2014) jauh lebih rendah dibandingkan dengan densitas kista spesies tersebut di Teluk Ambon (2014) dan pesisir Cirebon (2017). Densitas kista *P. bahamense* di Teluk Lampung dan Teluk Jakarta

hanya berjumlah <50 kista.g⁻¹ sedimen basah, sedangkan di Teluk Ambon dan pesisir Cirebon densitas kista spesies tersebut dapat mencapai >500 kista.g⁻¹ sedimen basah.

Kista *P. bahamense* termasuk kista dinoflagellata yang umum ditemukan pada penelitian terdahulu di Teluk Jakarta (Matsuoka et al., 1999), namun kasus MAB oleh spesies dinoflagellata tersebut belum pernah tercatat atau dilaporkan di perairan tersebut. Sementara itu, meskipun kasus MAB *P. bahamense* pernah dilaporkan pada 1999 di Teluk Lampung (Praseno et al., 2003), namun saat ini Teluk Lampung sedang mengalami masalah akibat ledakan populasi dinoflagellata jenis *Margalefudinium polykrikoides* yang muncul secara tiba-tiba pada akhir tahun 2012 (Thoha et al., 2019). Sebagai akibatnya, kista spesies *M. polykrikoides* diketahui mendominasi pusat deposit (*cyst bank*) dinoflagellata pada sedimen dasar perairan, dengan deposit terbesarnya ditemukan di utara Teluk Lampung dan berada di depan area pembuangan limbah perkotaan (Thoha et al., 2019). Dominasi kista *M. polykrikoides* paska ledakan populasi pada 2012 dapat menjadi penyebab bergesernya distribusi kista *P. bahamense* menjauh dari area dengan tingkat aktivitas manusia yang tinggi di utara Teluk Lampung.

Berbeda dengan Teluk Lampung dan Teluk Jakarta, Teluk Ambon diketahui pernah mengalami beberapa kali kasus ledakan populasi *P. bahamense*, dengan salah satu kasus terparah yang dilaporkan pada 1994 (Mizushima et al., 2007; Praseno et al., 2003; Wiadnyana et al., 1996) dan kasus terbaru yang dilaporkan pada 2009 dan 2012 (Likumahua, 2015). Dengan ditemukannya densitas kista *P. bahamense* yang sangat tinggi mencapai >1.000 kista.g⁻¹ sedimen basah, maka kemungkinan terjadinya ledakan populasi spesies tersebut sangat tinggi pada masa depan. Sama halnya seperti di Teluk Ambon, ledakan populasi *P. bahamense* di pesisir Cirebon telah menjadi masalah besar sejak tahun 2016 – 2018 (Rachman et al., 2019) dan kasus PSP di kawasan tersebut telah dikategorikan sebagai Kejadian Luar Biasa (KLB) (Nurlina & Liambo, 2018). Seperti yang telah dilaporkan pada penelitian terdahulu (Rachman et al., 2019), pusat deposit kista *P. bahamense* di perairan pesisir Cirebon pada 2017 berada di sisi selatan area kajian dan berdekatan dengan pusat kota dan pelabuhan besar yang ada di pesisir daerah Cirebon.

Terdapat banyak faktor yang menyebabkan tinggi atau rendahnya densitas kista *P. bahamense* pada sedimen dasar perairan pesisir, seperti tingkat trofik perairan, laju sedimentasi, ukuran butir (*grain size*) sedimen, pola arus, salinitas, suhu, dan komposisi senyawa atau komponen penyusun sedimen (Morquecho et al., 2014; Siringan et al., 2008). Namun dalam kajian ini, salah satu faktor yang menyebabkan perbedaan yang signifikan pada densitas kista *P. bahamense* antara Teluk Lampung, Teluk Jakarta, Teluk Ambon, dan pesisir Cirebon terletak pada sejarah ledakan populasi spesies tersebut di masing-masing lokasi kajian.

Di area kajian yang sering mengalami ledakan populasi *P. bahamense*, densitas kista spesies tersebut menjadi tinggi karena banyaknya sel planktonik yang menghasilkan kista dan kemudian terakumulasi pada sedimen dasar perairan pada setiap akhir periode *blooming*. Dengan demikian, densitas kista di lokasi-lokasi yang menjadi pusat deposit atau *cyst bank* dari kista *P. bahamense* pun semakin tinggi seiring dengan semakin seringnya spesies tersebut ‘meledak’ di perairan. Sebagai contoh, di perairan Teluk Manila, Filipina, yang merupakan teluk dengan karakter geografis semi-tertutup (*semi-enclosed bay*), ledakan populasi *P. bahamense* yang berulang secara periodik sejak 1988-1998 diakibatkan oleh tingginya suplai sel planktonik *P. bahamense* dari deposit kista di dasar perairan tersebut (Usup et al., 2012). Di sisi lain, berulangnya kasus ledakan populasi atau Marak Alga Berbahaya (MAB) yang diakibatkan oleh *P. bahamense* juga mengindikasikan dua hal, yaitu (1) kondisi perairan di lokasi terdampak sangat mendukung untuk pertumbuhan cepat sel *P. bahamense* di kolom air; dan (2) terdapat faktor-faktor pemicu germinasi kista yang sesuai, seperti adanya agitasi atau gangguan pada dasar perairan, serta suhu, salinitas, intensitas atau durasi penyinaran, kandungan nutrisi, serta kandungan oksigen di sedimen yang mendukung proses germinasi tersebut (Brosnahan et al., 2020; Genovesi-Giunti et al., 2006; Morquecho et al., 2014).

Zonasi tingkat risiko MAB *P. bahamense* di perairan-perairan kajian

Pada kajian ini, peta distribusi tingkat risiko terjadinya ledakan populasi *P. bahamense* dibuat berdasarkan data distribusi dan densitas kista spesies tersebut dengan menggunakan kategori atau kelas densitas kista yang disusun oleh McMinn (1991) dan Tian et al. (2018). Hasil

analisis menunjukkan tingkat risiko terjadinya fenomena MAB (Marak Alga Berbahaya) *P. bahamense* di perairan Teluk Jakarta dan Teluk Lampung lebih rendah dibandingkan dengan Teluk Ambon dan pesisir Cirebon. Temuan itu didasarkan atas hasil analisis terhadap rerata tingkat risiko MAB, serta rerata densitas kista *P. bahamense* yang ditemukan pada sedimen dasar perairan masing-masing area kajian. Sebagai catatan, nilai Tingkat Risiko MAB yang tinggi menunjukkan tingkat risiko akan munculnya fenomena MAB bila terjadi perubahan kondisi perairan yang dapat memicu proses germinasi atau *excystment*, serta pertumbuhan cepat populasi dinoflagellata, terutama *P. bahamense*.

Dalam kajian ini, distribusi dan densitas kista *P. bahamense* di dasar perairan menentukan pembagian zonasi rawan ledakan populasi spesies tersebut di perairan Teluk Lampung, Teluk Jakarta, Teluk Ambon, dan pesisir Cirebon. Penentuan zonasi tersebut juga didasarkan pada hasil analisis terhadap besar deposit kista *P. bahamense* di stasiun-stasiun pengambilan sampel yang berada di sekitar zona rawan tersebut. Sebagai contoh, meskipun pusat deposit kista *P. bahamense* di Teluk Lampung pada 2014 ditemukan di stasiun LMPG-1.07 yang terletak di selatan teluk, namun zona paling rawan (Tingkat Risiko 2) di Teluk Lampung berada di perairan Teluk Hurun yang terletak di sisi barat Teluk Lampung. Hal tersebut terjadi karena terdapat 3 stasiun penelitian (LMPG-3.06, LMPG-3.03, LMPG-3.04) dengan densitas kista *P. bahamense* pada tingkat/kategori rendah (1-100 kista.g⁻¹ sedimen) serta bentuk geografis Teluk Hurun yang merupakan teluk kecil dengan pergerakan arus yang lebih terbatas. Sehingga mengakibatkan kemungkinan terjadinya penumpukan kista *P. bahamense* di dasar perairan seiring dengan proses sedimentasi alami di perairan Teluk Lampung. Sehingga area perairan tersebut dapat ditentukan sebagai area yang paling rawan MAB *P. bahamense* serta dapat menjadi sumber sel planktonik bila terjadi ledakan populasi spesies tersebut pada masa depan. Sebagai informasi, berdasarkan data dalam publikasi sebelumnya oleh Thoha et al. (2019), perairan di sekitar Desa Hanura di Teluk Lampung juga diketahui memiliki deposit kista *M. polykrikoides* dengan kategori rendah hingga menengah (100-1000 kista.g⁻¹ sedimen).

Berbeda dengan Teluk Lampung, tingkat risiko terjadinya ledakan populasi *P. bahamense* semakin berkurang seiring dengan bertambahnya jarak dengan pesisir pantai di Teluk Jakarta.

Berdasarkan data dan sampel dari tahun 2014, zona yang paling rawan di perairan tersebut berada dekat di sebelah utara dari kawasan Ancol, Jakarta Utara, serta hingga jauh ke tengah perairan teluk sebelah utara dari kawasan Cilincing (Jakarta Utara) dan Marunda (Bekasi). Gradasi risiko terjadinya fenomena MAB oleh *P. bahamense* terlihat mengikuti gradien dampak antropogenik di perairan, yang semakin tinggi di wilayah yang paling dekat dengan pesisir atau pusat aktivitas manusia. Perairan Teluk Jakarta yang berada paling dekat dengan pesisir pantai diketahui terpengaruh kuat oleh masukan massa air tawar dan nutrisi dari sungai-sungai besar di kota Jakarta, sedangkan perairan yang berada jauh dari garis pantai mengalami proses pencampuran dengan massa air oligotrofik yang berasal dari Laut Jawa (Damar et al., 2012).

Pola tingkat risiko yang mengikuti pola gradien tingkat aktivitas manusia di kawasan pesisir juga ditemukan di perairan Cirebon pada 2017. Seperti yang terlihat pada analisis ulang dalam kajian ini, dan yang telah dilaporkan oleh Rachman et al. (2019), deposit kista dan tingkat risiko MAB *P. bahamense* terlihat semakin tinggi di area selatan perairan Cirebon, yang merupakan pusat aktivitas manusia di Kota Cirebon. Berbeda dengan Teluk Jakarta, densitas kista *P. bahamense* yang mencapai kategori menengah (100-1000 kista.g⁻¹ sedimen) hampir di semua wilayah di selatan area kajian menunjukkan tingginya risiko terjadinya ledakan populasi *P. bahamense* di area tersebut. Sebagai tambahan, cakupan wilayah kajian pada penelitian yang telah dilakukan pada 2017 oleh Rachman et al. (2019) masih sangat sempit dan belum mencakup banyak wilayah di selatan dan timur perairan Cirebon. Dengan demikian, deposit kista *P. bahamense* yang sebenarnya tersimpan di sedimen dasar perairan Cirebon masih belum banyak diketahui posisi dan besar depositnya. Mengingat kasus MAB oleh *P. bahamense* di Cirebon yang cukup masif pada 2016-2018, serta telah menimbulkan korban jiwa dan dikategorikan sebagai Kejadian Luar Biasa (KLB) (Nurlina & Liambo, 2018), maka perluasan area kajian pada penelitian lanjutan untuk menemukan deposit kista *P. bahamense* lainnya di perairan pesisir Cirebon menjadi sangat penting untuk segera dilakukan.

Serupa dengan perairan pesisir Cirebon, tingkat risiko terjadinya MAB *P. bahamense* di perairan Teluk Ambon termasuk dalam kategori menengah (Nilai Tingkat Risiko 3). Dari hasil analisis ulang terhadap data dan sampel penelitian pada tahun 2014, dapat dikatakan bahwa

keseluruhan teluk dalam dari Teluk Ambon merupakan zona yang sangat rawan Marak Alga Berbahaya *P. bahamense*. Hal tersebut didasarkan pada distribusi nilai tingkat risiko MAB yang hampir merata pada tingkat menengah (nilai 3; densitas kista 100-1.000 kista.g⁻¹ sedimen) dan juga tinggi (nilai 4; densitas kista 1000-10.000 kista.g⁻¹ sedimen). Sebagai informasi, kista *P. bahamense* yang ditemukan pada penelitian terdahulu mencapai >3.000 kista.g⁻¹ sedimen dan diduga menjadi penyebab utama munculnya fenomena MAB *P. bahamense* di perairan Teluk Ambon pada 1994 (Likumahua, 2015; Mizushima et al., 2007).

Lokasi dengan densitas kista *P. bahamense* yang tinggi pada kajian ini merupakan area dengan tingkat risiko MAB yang tinggi serta dapat berperan penting dalam inisiasi ledakan populasi spesies tersebut. Namun, ada kemungkinan area tersebut memiliki faktor lingkungan yang tidak mendukung germinasi kista spesies *P. bahamense*. Misalnya, area tersebut mungkin memiliki sedimen yang bersifat anoksik, suhu yang terlalu tinggi atau rendah, atau tidak menyediakan kolom air yang memiliki intensitas cahaya yang cukup untuk germinasi atau untuk tumbuh dan berkembangnya sel planktonik *P. bahamense* (Anderson, 1989). Meskipun demikian, beberapa kajian di perairan yang secara berkala mengalami MAB *P. bahamense*, seperti Teluk Manila di Filipina, menunjukkan indikasi kuat bahwa deposit kista di dasar perairan menjadi sumber utama atau titik awal terjadinya ledakan populasi spesies toksik tersebut (Azanza et al., 2004; Villanoy et al., 2006). Selain itu, keberadaan kista spesies dinoflagellata tertentu pada sedimen dasar perairan, terutama yang bersifat toksik serta dapat menyebabkan munculnya MAB, dapat digunakan sebagai peringatan awal (*early warning*) terhadap kemungkinan terjadinya ledakan populasi spesies tersebut di masa depan (Furio et al., 2012). Meskipun demikian, nilai Tingkat Risiko MAB *P. bahamense* dalam kajian ini baru mengandalkan data densitas kista spesies tersebut di sedimen dan belum memperhitungkan kondisi fisik-kimia sedimen ataupun kolom air yang dapat menjadi pemicu terjadinya ledakan populasi *P. bahamense* di perairan. Dengan demikian masih diperlukan kajian lebih lanjut dan mendalam untuk menyempurnakan perhitungan yang digunakan untuk menentukan nilai Tingkat Risiko MAB *P. bahamense* tersebut.

Implikasi dari hasil kajian dan langkah mitigasi

Mengingat besarnya dampak negatif yang dapat ditimbulkan oleh MAB *P. bahamense* di perairan, maka langkah-langkah mitigasi untuk mengurangi dampak tersebut menjadi sangat penting untuk dilakukan. Salah satunya adalah dengan memanfaatkan peta zona tingkat risiko MAB *P. bahamense* yang dihasilkan dalam kajian ini sebagai dasar untuk menentukan wilayah-wilayah yang harus dihindari pemanfaatannya, atau yang memerlukan pengawasan (*monitoring*) rutin. Sebagai contoh, keseluruhan perairan Teluk Ambon dalam, yang berdasarkan kajian ini digolongkan dalam kawasan yang paling rawan mengalami fenomena MAB *P. bahamense*, merupakan wilayah yang harus dihindari untuk dimanfaatkan sebagai kawasan budidaya. Hal ini penting untuk menghindari terjadinya penumpukan nutrien sisa pakan ke dasar perairan, yang dapat memicu proses germinasi kista *P. bahamense*. Selain itu di kawasan itu juga sebaiknya tidak dilakukan aktivitas yang mengganggu sedimen dasar perairan dan dapat mengakibatkan resuspensi kista *P. bahamense* ke kolom air dan memicu germinasi, serta ledakan populasinya. Selain menghindari area yang memiliki risiko tinggi untuk terjadinya MAB *P. bahamense*, langkah lain yang dapat dilakukan untuk mengurangi kemungkinan munculnya fenomena tersebut adalah dengan mengendalikan input nutrien ke perairan melalui pengolahan limbah yang baik. Hal ini penting dilakukan untuk menghindari terjadinya eutrofikasi di dalam kolom air, serta pengayaan senyawa organik dan anorganik di sedimen, yang dapat memicu proses germinasi pada kista *P. bahamense*, atau kista dinoflagellata merugikan lainnya.

Selain melakukan langkah pencegahan, strategi lain yang penting untuk dilakukan adalah melakukan pemetaan distribusi kista secara lebih menyeluruh di perairan yang terdampak berat oleh fenomena MAB *P. bahamense*, seperti di Teluk Ambon dan pesisir Cirebon. Seperti yang telah ditunjukkan pada kajian ini dan dibahas lebih lanjut pada publikasi oleh Rachman et al. (2019), sebaran titik atau stasiun pengambilan sampel (stasiun *sampling*) di perairan Cirebon masih sangat renggang, jumlahnya terlalu sedikit, dan cakupan area *sampling*-nya pun belum memadai untuk menghasilkan peta sebaran dan lokasi deposit kista *P. bahamense* yang akurat di pesisir perairan tersebut. Meskipun Anderson (1989) menyatakan bahwa pemetaan distribusi kista secara kuantitatif di perairan merupakan pekerjaan

yang memakan banyak waktu (*time-consuming*), namun mengingat besarnya dampak negatif yang dapat terjadi akibat MAB *P. bahamense* di perairan Indonesia, maka pekerjaan pemetaan kista tersebut menjadi sangat penting untuk dilakukan.

Kesimpulan

Secara umum perairan yang paling rawan mengalami fenomena MAB *P. bahamense* pada masa depan adalah perairan Teluk Ambon dan pesisir Cirebon. Indikasi ini didasarkan pada tingginya densitas kista *P. bahamense* dan besarnya deposit kista spesies *P. bahamense* pada *cyst bank* yang tersebar di beberapa titik di perairan Teluk Ambon dan pesisir Cirebon. Keberadaan *cyst bank* di area perairan Teluk Lampung dan Teluk Jakarta, juga perlu mendapatkan perhatian serius guna mengurangi kemungkinan terjadinya ledakan populasi *P. bahamense* yang dapat dimulai dari pusat-pusat deposit kista dinoflagellate dari spesies *P. bahamense*. Selain itu, data lokasi *cyst bank*, serta zonasi tingkat kerawanan ledakan populasi *P. bahamense* yang dihasilkan dalam kajian ini diharapkan dapat dijadikan acuan untuk melakukan kegiatan mitigasi bencana Marak Alga Berbahaya di perairan Teluk Lampung, Teluk Jakarta, Teluk Ambon, dan pesisir Cirebon. Peta yang dibuat juga dapat digunakan untuk mengantisipasi agar aktivitas manusia di perairan tidak terdampak pada kolom air, atau pun sedimen dasar perairan di area sekitar *cyst bank*. Langkah antisipasi ini perlu dilakukan untuk mencegah terpicunya proses germinasi kista *P. bahamense* yang pada akhirnya dapat menimbulkan fenomena MAB yang berdampak negatif bagi kesehatan ekosistem maupun masyarakat yang tinggal di kawasan pesisir.

Persantunan

Kajian ini merupakan bagian dari kegiatan penelitian DDR (*Demand Driven Reserach*) yang didanai oleh program COREMAP-CTI di tahun 2020. Sampel dan data yang digunakan dalam kajian ini merupakan hasil dari kegiatan riset terdahulu yang didanai oleh: (1) DIPA Pusat Penelitian Oseanografi-LIPI 2013-2014 (Teluk Jakarta, Teluk Lampung, dan Teluk Ambon) bekerja sama dengan Institut de Recherche pour le Développement (IRD) dan University of Montpellier, Prancis; dan (2) DIPA P2O-LIPI 2017 (pesisir Cirebon). Kami mengucapkan

terima kasih kepada seluruh anggota tim peneliti yang terlibat dalam seluruh kegiatan penelitian, baik dalam penelitian DDR 2020 ini maupun penelitian terdahulu yang data dan sampelnya dipergunakan dalam kajian ini. Terima kasih juga kami ucapkan kepada para teknisi Lab Plankton P2O-LIPI yang telah menjalani masa pensiun, yaitu ibu Trimaningsih, ibu Elly Asnaryati, dan ibu Sugestiningasih. Sebagai tambahan, dalam penulisan artikel ilmiah ini, Arief Rachman dan Mariana D.B. Intan bertindak sebagai kontributor utama, sedangkan para penulis lainnya, yaitu Hikmah Thoha, Oksto Ridho Sianturi, Muawanah, Hanung Agus Mulyadi dan Estelle Masseret secara bersama-sama berkontribusi sebagai kontributor anggota.

DaftarPustaka

- Anderson, D. M. (1989). Cysts as factors in *Pyrodinium bahamense* ecology. In G. M. Hallegraeff and J. L. Maclean (Eds) *Biology, Epidemiology and Management of Pyrodinium Red Tides* Vol. 21 (pp. 81-88). Bandar Seri Begawan, Brunei Darussalam: Fisheries Department, Ministry of Development, Brunei Darussalam and International Center for Living Aquatic Resource Management, Manila, Philippines.
- Azanza, R. V., & Max Taylor, F. J. R. (2001). Are *Pyrodinium* Blooms in the Southeast Asian Region Recurring and Spreading? A View at the End of the Millennium. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 30(6), 356-364, 359.
- Azanza, R. V., Siringan, F. P., Diego Mcglone, M. L. S., Yñiguez, A. T., Macalalad, N. H., Zamora, P. B., Agustin, M. B. and Matsuoka, K. (2004). Horizontal dinoflagellate cyst distribution, sediment characteristics and benthic flux in Manila Bay, Philippines. *Phycological Research*, 52(4), 376-386.
- Blanco, J. (1986). Separacion de quistes de dinoflagelados en gradiente de densidad. *Boletin del Instituto Espanol de Oceanografia*, 3, 81-84.
- Brosnahan, M. L., Fischer, A. D., Lopez, C. B., Moore, S. K., & Anderson, D. M. (2020). Cyst-forming dinoflagellates in a warming climate. *Harmful Algae*, 91, 101728. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.101728>
- Corrales, R. A., & Maclean, J. L. (1995). Impacts of harmful algae on seafarming in the Asia-

- Pacific areas. *Journal of Applied Phycology*, 7(2), 151-162. <https://doi.org/10.1007/BF00693062>
- Dale, B., Thorsen, T. A., & Fjellsa, A. (1999). Dinoflagellate Cysts as Indicators of Cultural Eutrophication in the Oslofjord, Norway. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 48(3), 371-382. <https://doi.org/10.1006/ecss.1999.0427>
- Damar, A., Colijn, F., Hesse, K.-J., & Wardiatno, Y. (2012). The eutrophication states of Jakarta, Lampung and Semangka Bays: Nutrient and phytoplankton dynamics in Indonesian tropical waters. *Journal of Tropical Biology & Conservation*, 9(1), 61-81.
- Damar, A., Hesse, K.-J., Colijn, F., & Vitner, Y. (2019). The eutrophication states of the Indonesian sea large marine ecosystem: Jakarta Bay, 2001–2013. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 163, 72-86. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2019.05.012>.
- Duarte, C., Conley, D., Carstensen, J., & Sánchez-Camacho, M. (2009). Return to Neverland : Shifting Baselines Affect Eutrophication Restoration Targets. *Journal of the Coastal and Estuarine Research Federation*, 32(1), 29-36. <https://doi.org/10.1007/s12237-008-9111-2>.
- Furio, E. F., Azanza, R. V., Fukuyo, Y., & Matsuoka, K. (2012). Review of geographical distribution of dinoflagellate cysts in Southeast Asian coasts. *Coastal marine science*, 35(1), 20-33.
- Genovesi-Giunti, B., Laabir, M., & Vaquer, A. (2006). The benthic resting cyst: a key actor in harmful dinoflagellate blooms-A review. *Vie et milieu (1980)*, 56(4), 327-337.
- Genovesi, B., Laabir, M., Masseret, E., Collos, Y., Vaquer, A., & Grzebyk, D. (2009). Dormancy and germination features in resting cysts of *Alexandrium tamarense* species complex (Dinophyceae) can facilitate bloom formation in a shallow lagoon (Thau, southern France). *Journal of Plankton Research*, 31(10), 1209-1224. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbp066>.
- Kim, S.-Y., Moon, C.-H., Cho, H.-J., & Lim, D.-I. (2009). Dinoflagellate Cysts in Coastal Sediments as Indicators of Eutrophication: A Case of Gwangyang Bay, South Sea of Korea. *Estuaries and Coasts*, 32(6), 1225-1233. <https://doi.org/10.1007/s12237-009-9212-6>.
- LeGresley, M., & McDermott, G. (2010). Counting chamber methods for quantitative phytoplankton analysis—haemocytometer, Palmer-Maloney cell and Sedgewick-Rafter cell. In B. Karlson, C. Cusack, & E. Bresnan (Eds.), *Microscopic and molecular methods for quantitative phytoplankton analysis. UNESCO (IOC Manuals and Guides)* (Vol. 110, pp. 25-30). Spain: Intergovernmental Oceanographic Commission, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Likumahua, S. (2015). Recent blooming of *Pyrodinium bahamense* var. *compressum* in Ambon Bay, Eastern Indonesia. *Marine Research in Indonesia*, 38(1), 31-37.
- Matsuoka, K. (1989). *Morphological features of the cyst of Pyrodinium bahamense* var. *compressum*. In G. M. Hallegraeff and J. L. Maclean (Eds) ICLARM Conference. Vol. 21 (pp. 219-229). Bandar Seri Begawan, Brunei Darussalam: Fisheries Department, Ministry of Development, Brunei Darussalam and International Center for Living Aquatic Resource Management, Manila, Philippines.
- Matsuoka, K., Fukuyo, Y., P Praseno, D., Adnan, Q., & Kodama, M. A. (1999). Dinoflagellate cysts in surface sediments of Jakarta Bay, off Ujung Pandang and Larantuka of Flores Islands, Indonesia with special reference of *Pyrodinium bahamense*. *Bull. Fac. Fish. Nagasaki Univ*, 80, 49-54.
- McMinn, A. (1991). Recent dinoflagellate cysts from estuaries on the central coast of New South Wales, Australia. *Micropaleontology*, 37(3), 269-287.
- Mizushima, K., Matsuoka, K., & Fukuyo, Y. (2007). Vertical distribution of *Pyrodinium bahamense* var. *compressum* (Dinophyceae) cysts in Ambon Bay and Hurun Bay, Indonesia. *Plankton and Benthos Research*, 2(4), 163-174.
- Morquecho, L., Alonso-Rodríguez, R., & Martínez-Tecuapacho, G. A. (2014). Cyst morphology, germination characteristics, and potential toxicity of *Pyrodinium bahamense* in the Gulf of California. *Botanica Marina*, 57(4), 303. <https://doi.org/10.1515/bot-2013-0121>.
- Nurlina, A., & Liambo, A. A. (2018). *Kejadian Luar Biasa Paralytic Shellfish Poisoning Pada Konsumsi Kerang Hijau Terkontaminasi Saxitoxin di Kabupaten*

- Cirebon, Indonesia, Desember 2016. Prosiding Seminar Nasional dan Diseminasi Penelitian Kesehatan. Vol. 1. (pp. 134-141) Tasikmalaya, Indonesia: STIKes Bakti Tunas Husada, Tasikmalaya.
- Praseno, D., Fukuyo, Y., Widiarti, R., & Sugestiningih. (2003). *Red tide occurrences in Indonesian waters and the need to establish a monitoring system*. Paper presented at the Proceedings of Workshop on Red tide Monitoring in Asian Coastal Waters.
- Rachman, A., Thoha, H., Sianturi, O. R., Bayu, M. D., Fitriya, N., Sidabutar, T., Witasari, Y., Wibowo, S. P. A. & Iwataki, M. (2019). Distribution of *Pyrodinium bahamense* cysts in modern sediments of Sukalila water, Cirebon, Indonesia. *Philippine Journal of Natural Sciences*, 24(1 & 2), 104 - 115.
- Satta, C. T., Anglès, S., Lugliè, A., Guillén, J., Sechi, N., Camp, J., & Garcés, E. (2013). Studies on dinoflagellate cyst assemblages in two estuarine Mediterranean bays: A useful tool for the discovery and mapping of harmful algal species. *Harmful Algae*, 24, 65-79. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2013.01.007>.
- Sidabutar, T., Thoha, H., Bayu D., M., Rachman, A., Sianturi, O. R., Fitriya, N., Muawanah, Mulyadi, H. A., Likumahua, S. & Masseret, E. (2016). Occurrence of *Pyrodinium bahamense* blooms related to cyst accumulation in the bottom sediments in the bays at Ambon, Lampung and Jakarta, Indonesia. *Harmful Algae News*, 52, 8-9.
- Siringan, F. P., Azanza, R. V., Macalalad, N. J. H., Zamora, P. B., & Sta. Maria, M. Y. Y. (2008). Temporal changes in the cyst densities of *Pyrodinium bahamense* var. *compressum* and other dinoflagellates in Manila Bay, Philippines. *Harmful Algae*, 7(4), 523-531. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2007.11.003>.
- Thoha, H., Muawanah, M., Bayu Intan, M., Rachman, A., Sianturi, O. R., Sidabutar, T., Iwataki, M., Takahashi, K., Avarre, J.-C. & Masseret, E. (2019). Resting cyst distribution and molecular identification of the harmful dinoflagellate *Margalefidinium polykrikoides* (Gymnodiniales, Dinophyceae) in Lampung Bay, Sumatra, Indonesia. *Frontiers in microbiology*, 10, 1-12.
- Tian, C., Doblin, M. A., Dafforn, K. A., Johnston, E. L., Pei, H., & Hu, W. (2018). Dinoflagellate cyst abundance is positively correlated to sediment organic carbon in Sydney Harbour and Botany Bay, NSW, Australia. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(6), 5808-5821. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0886-1>.
- Usup, G., Ahmad, A., Matsuoka, K., Lim, P. T., & Leaw, C. P. (2012). Biology, ecology and bloom dynamics of the toxic marine dinoflagellate *Pyrodinium bahamense*. *Harmful Algae*, 14, 301-312.
- Usup, G., Kulis, D. M., & Anderson, D. M. (1994). Growth and toxin production of the toxic dinoflagellate *Pyrodinium bahamense* var. *compressum* in laboratory cultures. *Natural toxins*, 2(5), 254-262.
- Villanoy, C. L., Azanza, R. V., Altemerano, A., & Casil, A. L. (2006). Attempts to model the bloom dynamics of *Pyrodinium*, a tropical toxic dinoflagellate. *Harmful Algae*, 5(2), 156-183. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2005.07.001>.
- Wiadnyana, N., & Sidabutar, T. (1997). *Monitoring of harmful Dinoflagellates in the east Indonesian waters*. Paper presented at the Proc. ASEAN-Canada Technical Conference on Marine Science: Quality Criteria and Monitoring for Aquatic Life and Human Health Protection.
- Wiadnyana, N., Sidabutar, T., Matsuoka, K., Ochi, T., Kodama, M., & Fukuyo, Y. (1996). Note on the occurrence of *Pyrodinium bahamense* in eastern Indonesian waters. *Harmful and Toxic Algal Blooms.*, 53-56.
- Xiao, W., Liu, X., Irwin, A. J., Laws, E. A., Wang, L., Chen, B., Zeng, Y. & Huang, B. (2018). Warming and eutrophication combine to restructure diatoms and dinoflagellates. *Water Research*, 128, 206-216.
- Yang, C.-S., Kao, S.-P., Lee, F.-B., & Hung, P.-S. (2004). Twelve different interpolation methods: A case study of Surfer 8.0. *ISPRS*, 778-783.