

PENGARUH FENOMENA *INDIAN OCEAN DIPOLE* TERHADAP PALEOEKOLOGI DAN PALEOPRODUKTIVITAS FORAMINIFERA DI PERAIRAN SELAT SUNDA PADA WAKTU PLEISTOSEN-HOLOSEN

ELDIAN YOSUA BUDIARTO¹, KHOIRIL ANWAR MARYUNANI¹, LULI GUSTIANTINI²

1. Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung (ITB), Jl. Ganesha No.10, Bandung, Jawa Barat, Indonesia.
2. Balai Besar Survei dan Pemetaan Geologi kelautan (BBSPGL), ESDM, Jl. Dr. Junjunan No. 236, Bandung, Jawa Barat, Indonesia.

Sari – Selat Sunda termasuk bagian dari Paparan Sunda yang merupakan salah satu paparan terbesar di dunia, dengan perairan regional yang dipengaruhi oleh *South Java Current* (SJC). Daerah Selat Sunda juga menjadi daerah yang terpengaruh oleh *Indian Ocean Dipole* (IOD) positif dan negatif yang diinisiasi oleh intensifikasi siklus Hadley dan interaksi muson Asia-Australia. Kompleksitas variabel oseanografi di Selat Sunda pada kondisi modern menimbulkan pertanyaan mengenai terjadi atau tidaknya kondisi modern ini pada masa lampau. Selama peristiwa *Last Glacial Maximum* (LGM), tinggi permukaan air laut lebih rendah mendekati 130 m di bawah permukaan laut saat ini dan menyebabkan Paparan Sunda terekspos menjadi *Sundaland*. Paparan Sunda mengalami *flooding* pada ~10.000 tahun lalu akibat peningkatan eustasi yang menyebabkan perairan Selat Sunda terkoneksi dengan Laut Jawa seperti saat ini. Penelitian ini dilakukan pada sedimen laut BS-05 yang termasuk dalam perairan Selat Sunda dengan koordinat 7° 1'38.83"LS, 105° 6'16.31"BT, diambil dari kedalaman 1.565 m di bawah permukaan air laut. Penelitian ini berfokus pada rekaman foraminifera planktonik dan bentonik dari 69 kedalaman yang dicuplik dari kedalaman 0 hingga 264 cm dengan interval 4 cm, dengan umur Pleistosen Akhir hingga Holosen. Analisis dilakukan dengan metode statistik berupa *single fauna method*, *two or more species*, dan *whole fauna method*. Hasil analisis menunjukkan sebelum deglasiasi (akhir Pleistosen), SPL relatif lebih dingin, aktivitas *upwelling* lebih tinggi, kedalaman termoklin dangkal, dengan paleoproduktivitas dikendalikan oleh *upwelling*, sebagai akibat dominasi IOD positif. Setelah deglasiasi (Holosen), SPL relatif menjadi lebih hangat, dengan aktivitas *upwelling* dan kedalaman termoklin yang mengalami fluktuasi, dengan paleoproduktivitas dikendalikan masukan material terigen dari Laut Jawa dan *upwelling*. Hal ini mengimplikasikan bahwa peningkatan paleoproduktivitas pada dominasi IOD negatif terjadi akibat terhubungnya Selat Sunda dan Laut Jawa, dengan beberapa interval waktu dominasi IOD positif, contohnya pada interval 6.000 hingga 4.000 tahun lalu.

Kata kunci: foraminifera, paleoekologi, paleoproduktivitas, *Indian Ocean Dipole*, Selat Sunda

Abstract – *Sunda Strait is a part of Sunda Shelf which is among the widest shelves in the world, its ecology is regionally influenced by South Java Current (SJC). Its water is also influenced by positive and negative Indian Ocean Dipole (IOD) initiated by Hadley circulation intensification and interactions of Asian-Australian monsoon. The complex ocean variables that influence Sunda Strait in present day lead to the question about their significance in the past. During Last Glacial Maximum (LGM) event, sea surface level was 130 m lower than present, making Sunda Shelf a part of Sundaland. Sunda Shelf underwent a flooding in ~10.000 years ago caused by global sea level rise, connecting Sunda Strait with the Java Sea as it is. This research is conducted to the core coded BS-05 recovered from Sunda Strait seabed 1,565 m below the sea level with coordinate of 7° 1'38.83" latitude and 105° 6'16.31" longitude. This research focuses on planktonic and benthic foraminifera records from total 69 samples picked in 4 cm interval from 0 to 264 cm depths. The core covers age between Late Pleistocene and Holocene. This research is based on single fauna method, two or more species method, and whole fauna method. The result indicates that in Late Pleistocene, relative SST was cooler, upwelling was more intense, thermocline was shallow, with paleoproduktivitas influenced by upwelling induced by positive IOD. In Holocene, relative SST became warmer, with fluctuation of upwelling intensity and thermocline depth, furthermore, paleoproduktivitas was influenced by both terrigenous input from Java Sea, and upwelling. This indicates that increasing paleoproduktivitas during negative IOD was due to the mixture of Sunda Strait water and Java Sea water, with some period of positive IOD, particularly around 6.000 to 4.000 years ago.*

Key words: foraminifera, paleoecology, paleoproduktivitas, *Indian Ocean Dipole*, Sunda Strait

1. PENDAHULUAN

Perairan regional Selat Sunda dipengaruhi oleh *South Java Current* (SJC) yang juga terkoneksi dengan Laut Jawa sehingga membentuk percampuran sirkulasi air laut (Gingele dkk., 2001). Pada masa sekarang, ekologi di perairan Selat Sunda dipengaruhi oleh *Indian Ocean Dipole* (IOD) (Kwiatkowski dkk., 2015). Mekanisme IOD melibatkan perubahan suhu permukaan laut (SPL) di sepanjang lintang Samudra Hindia, meliputi perairan timur Afrika dan perairan barat Indonesia, hal ini secara langsung berpengaruh pada kedalaman termoklin di daerah tersebut (Abram dkk., 2007; Fischer dkk., 2005). IOD dibedakan menjadi IOD negatif dan IOD positif. IOD negatif dicirikan oleh peristiwa penghangatan SPL di bagian barat Indonesia pendinginan SOL di timur Afrika (Abram dkk., 2007). Sebaliknya, IOD positif dicirikan oleh pendinginan SPL yang umumnya disertai aktivitas *upwelling* di perairan barat Sumatra, yang menjadi pencetus naiknya produktivitas daerah sekitar (Webster dkk., 1999).

IOD bersama dengan fenomena lain seperti muson Asia-Australia, dan *El Niño Southern Oscillation* (ENSO) mempengaruhi iklim di perairan Selat Sunda. IOD memiliki hubungan erat dengan ENSO, ENSO diperkirakan menjadi pencetus IOD (Allan dkk., 2001; Baquero-Bernal dkk., 2002; Dommenget, 2011; Huang dan Kinter, 2002; Zhao dkk., 2019), IOD dapat pula terjadi akibat pengaruh internal perairan Samudra Hindia (Ashok dkk., 2003; Behera dkk., 2006; Yamagata dkk., 2004), maupun IOD sebagai pencetus ENSO (Cai dkk., 2019; Izumo dkk., 2010; Jourdain dkk., 2016; Luo dkk., 2010; Wang dkk., 2019; Wieners dkk., 2017; Zhou dkk., 2015). Muson Asia-Australia juga memiliki hubungan yang erat dengan IOD, dengan IOD diketahui menjadi pemicu tingginya curah hujan pada peristiwa muson panas Asia (Kinter dkk., 2002; Kumar dkk., 1999). Sejak Holosen, di perairan timur Samudra Hindia (Selat Sunda salah satunya), variabilitas SPL dan termoklin erat kaitannya dengan peristiwa IOD (Kwiatkowski dkk., 2015). Kompleksitas variabel oseanografi tersebut menimbulkan pertanyaan mengenai terjadi atau tidaknya kondisi tersebut pada masa lampau, khususnya kondisi IOD yang

tercerminkan oleh perubahan SPL di perairan Selat Sunda.

Selama peristiwa *Last Glacial Maximum* (LGM), tinggi permukaan air laut lebih rendah mendekati 130 m di bawah permukaan laut saat ini dan menyebabkan Paparan Sunda menjadi *Sundaland* (Tjia, 1980; Pelejero dkk., 1999; Hanebuth dkk., 2000). Berdasarkan model yang dibuat oleh DiNezio dan Tierney (2013) ada perbedaan sirkulasi air atmosferik Selat Sunda, dan peningkatan ariditas pada Samudra Hindia bagian timur dan tingginya salinitas permukaan sebelum LGM dibanding dengan pada saat ini. Berdasarkan data marin dan terestrial, Paparan Sunda mengalami *flooding* pada ~10 ribu tahun lalu akibat peningkatan eustasi (Hanebuth dkk., 2000, 2011; Griffiths dkk., 2009, 2013; Linsley dkk., 2010) yang menyebabkan perairan Selat Sunda menjadi terbuka dan terkoneksi dengan Laut Jawa seperti saat ini.

Penelitian terdahulu dilakukan pada daerah yang lokasinya cukup dekat dengan daerah penelitian yaitu oleh Setiawan dkk. (2015) dengan inti batuan GeoB 10042-1 dan GeoB 10043-2 dan Xu dkk. (2017) dengan inti batuan CJ01-185 (**Gambar 1**). Kedua penelitian ini belum melakukan pengamatan komunitas foraminifera secara detail, khususnya untuk beberapa segmen waktu setelah terbukanya Selat Sunda (Holosen). Penelitian ini dilakukan dengan fokus kepada interaksi komunitas foraminifera dengan IOD, dan implikasinya terhadap paleoekologi dan paleoproduktivitasnya, yang terkait dengan peristiwa terbukanya Selat Sunda pada Kala Holosen, dengan kerapatan data lebih tinggi sehingga lebih sensitif terhadap perubahan dalam interval waktu yang lebih pendek. Penelitian ini diharapkan dapat memberi gambaran yang lebih jelas terhadap perubahan paleoproduktivitas dan paleoekologi daerah penelitian, sekaligus menjadi acuan untuk penelitian di masa mendatang.

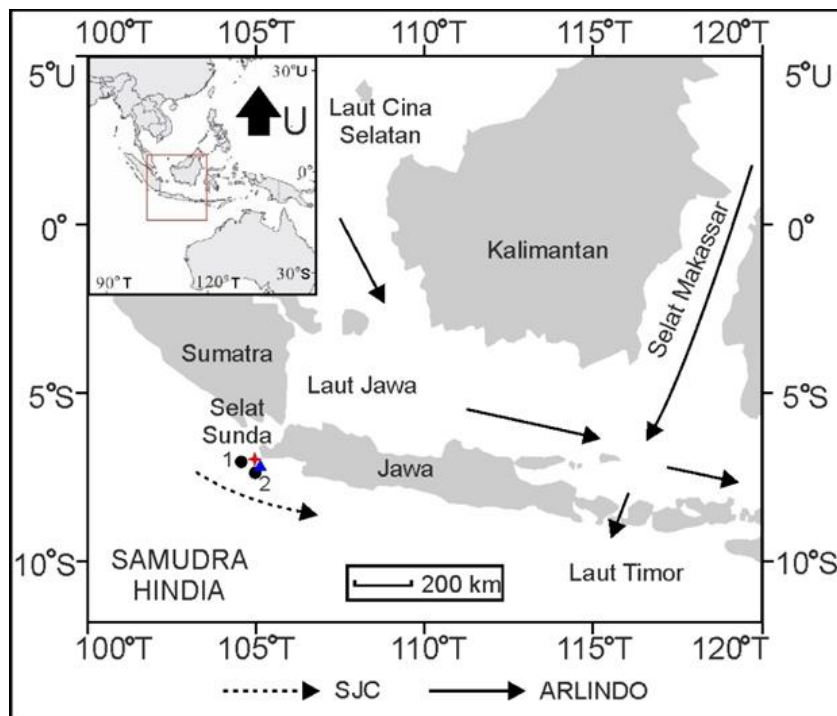
2. DATA DAN METODE PENELITIAN

2.1 Data dan Geokronologi

Data penelitian terbagi ke dalam dua jenis data yaitu data primer dan data sekunder. Data primer diambil

dari perairan Selat Sunda berkoordinat 7° 1'38.83"LS, 105° 6'16.31"BT, dari kedalaman 1.565 m di bawah permukaan air laut. Pengambilan data dilaksanakan dalam kerjasama riset berjudul *Benthic Records of Marine Environment, Climate, and Ecosystem in the Eastern Indian Ocean since the Last Deglaciation* (BENTHIC), pada tanggal 10-29 Desember 2014. Riset ini dianggotai oleh peneliti dari *First Institute of Oceanography* (FIO) Republik Rakyat Tiongkok, Badan Riset dan Sumber Daya Manusia Kelautan dan Perikanan Kementerian

Kelautan dan Perikanan (BRSDMKP KKP), Balai Besar Survei dan Pemetaan Geologi kelautan (BBSPGL), dan Pusat Penelitian Geoteknologi Badan Riset dan Inovasi Nasional (PPG BRIN). Jarak tempuh menuju lokasi penelitian kurang lebih 162 km dari pelabuhan Merak dengan kapal riset Geomarin III. Inti batuan berkode BS-05, diambil dari kedalaman 1.565 m di bawah permukaan air laut, dengan panjang inti batuan 273 cm berupa sedimen yang belum terkonsolidasi (Troa, 2014).



Gambar 1 Lokasi inti batuan BS-05 (segitiga biru), inti batuan CJ01-185 (Xu dkk., 2017) (bintang merah), dan GeoB 10042-1 (titik nomor 1) dan GeoB 10043-2 (titik nomor 2) (Setiawan dkk., 2015).

Data sekunder berupa data umur kalender (*dating*) dan kecepatan sedimentasi (*sedimentation rate*) dari inti batuan CJ01-185 yang digunakan oleh peneliti Xu dkk. (2017) (**Tabel 1**). Data tersebut digunakan karena kedua inti batuan memiliki jarak berdekatan (sekitar 650 m ke barat laut dari inti batuan BS-05), dan diambil pada *slope* yang sama (yaitu dengan kedalaman air laut titik bor CJ01-185 adalah 1.538 m di bawah permukaan air laut). Berdasarkan kedua hal tersebut, diasumsikan kedua titik bor memiliki kecepatan sedimentasi yang sama. Data kecepatan sedimentasi dan data umur kalender digunakan untuk membuat model umur inti batuan BS-05.

Selain itu, penggunaan umur relatif sebagai pendukung data asumsi berdasarkan foraminifera planktonik juga dilakukan pada kedalaman 236 cm sebagai penanda umur Resen yaitu 10.000 tahun *before present* (BP), ditandai oleh kemunculan pertama dari foraminifera planktonik *Globigerina calida* (Blow, 1969) (**Lampiran 1**).

Penghitungan umur secara matematis dilakukan menggunakan rumus:

$$Umur y = Umur x - \frac{interval kedalaman x}{interval kedalaman y}$$

dengan:

y = Kedalaman satu tingkat lebih muda

x = Kedalaman yang dirujuk

Hasil penghitungan tertera pada **Tabel 2**.

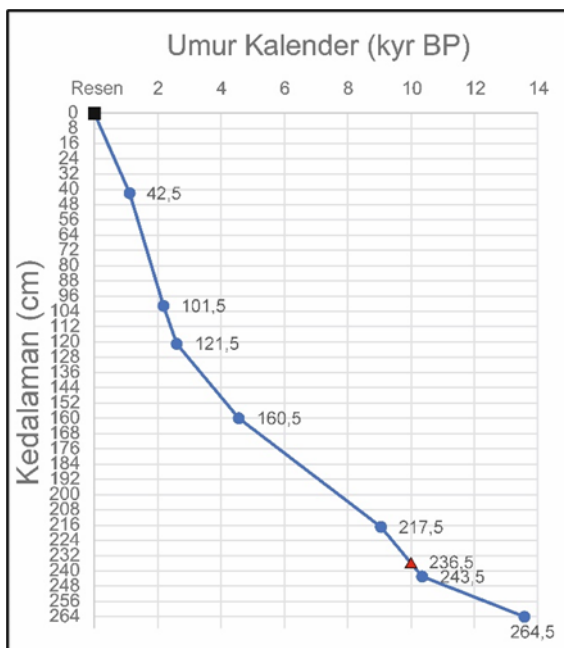
Model umur dibuat ke dalam kurva seperti pada **Gambar 2**.

Tabel 1 Data umur kalender dan kecepatan sedimentasi inti batuan CJ01-185 (Xu dkk. 2017).

Depth(cm)	Conventional AMS ¹⁴ C age(yr BP)	Calendar age (2σ)(cal yr BP)	δ ¹³ C	Depth interval	Sedimentation rates(cm kyr ⁻¹)
42-43	2400±30	1980 (1810-2150)	1.4	0-43	21.7
101-102	3280±30	3050(2850-3250)	2.1	43-102	55.1
121-122	3570±30	3463 (3385-3540)	1.4	102-122	48.4
160-161	5110±30	5425 (5270-5580)	1.0	122-161	19.9
217-218	9210±30	9923 (9675-10170)	0.9	161-218	12.7
243-244	10240±30	11220(11180-11260)	1.0	218-244	20.0
270-271	13180±50	15215(15115-15315)	0.8	244-270	6.5

Tabel 2 Hasil perhitungan umur lapisan inti batuan BS-05.

Kedalaman (cm)	Rentang kedalaman (cm)	Interval (cm)	Kecepatan sedimentasi (cm/yr)	Umur kalender (yr BP)
42-43	0-43	43	0,0217	1.118
101-102	43-102	59	0,0551	2.189
121-122	102-122	20	0,0484	2.602
160-161	122-161	39	0,0199	4.562
217-218	161-218	57	0,0127	9.050
236-237	218-237	19	0,02	10.000
243-244	237-244	7	0,02	10.350
264-265	244-265	21	0,0065	13.581



Gambar 2 Model umur kedalaman lapisan inti batuan BS-05 dalam *kiloyear before present* (kyr BP), lingkaran

biru menandakan lapisan dengan umur terkalibrasi berdasarkan kecepatan sedimentasi inti batuan CJ01-185 (Xu dkk., 2017), segitiga merah menandakan lapisan dengan umur biostratigrafi *Globigerina calida* sebagai penanda umur Holosen, kotak hitam menandakan lapisan berumur Resen.

2.2 Metode Penelitian

2.2.1 Preparasi

Tahap pertama yang dilakukan berupa preparasi inti batuan, dengan kedalaman yang digunakan berada pada 0 sampai 264 cm dari dasar laut, dan dicuplik fosil foraminifera dengan interval 4 cm. Masing-masing sampel ditimbang sesuai kebutuhan, dalam penelitian ini sampel diharapkan seberat 10 g. Sampel sedimen lepas dibersihkan dengan air dengan metode *swirling*, yaitu dengan cara mengaduk sampel dalam wadah berisi air hingga butirannya lepas. Setelah itu sedimen dicuci dengan air mengalir di atas saringan berukuran 63 µm, sedimen yang sudah dicuci kemudian didiamkan pada suhu ruangan selama 2 hari hingga kering, pada wadah yang sudah ditandai per sampel. Sedimen kemudian disaring pada *mesh* berukuran 250-315 µm, kemudian disimpan per sampel.

2.2.2 Determinasi Kuantitatif

Tahap ke dua yaitu tahap determinasi sampel untuk mengetahui kandungan spesies foraminifera dilakukan dengan mikroskop trinokuler Nikon SMZ 745 T di laboratorium mikropaleontologi Institut Teknologi Bandung. Spesies planktonik dideterminasi merujuk pada buku *Plankton Stratigraphy* (Bolli dkk., 1985), sedangkan genera bentonik merujuk pada buku *Foraminiferal Genera and Their Classification* (Loeblich dan Tappan, 1988). Menurut Dennison dan Hay (1967), pengamatan jumlah individu yang representatif terhadap 95% kemunculan seluruh fosil adalah sebanyak 300 individu. Sampel sedimen yang diamati termasuk memiliki kelimpahan foraminifera yang tinggi sehingga dalam kira-kira 5 g sudah terdapat 300 individu, sehingga dibagi ke dalam dua bagian (dua *split*). Pada bagian yang tidak diamati dicari spesies yang belum ditemukan pada bagian yang dicari, jika ada, spesies tersebut dimasukkan sebagai satu spesies.

Setelah seluruh spesies dideterminasi dan dihitung jumlahnya, dilakukan normalisasi terhadap jumlah spesies. Normalisasi terbagi atas dua tahapan, yaitu normalisasi terhadap jumlah pembagian (*split*). Berikut merupakan rumus yang digunakan untuk normalisasi berdasarkan pembagian sampel batuan.

$$\text{Jumlah spesies dalam sampel} = 2^N \times A$$

dengan:

N = Jumlah *split*

A = Jumlah spesies pada satu bagian yang dianalisis

Dilakukan juga normalisasi terhadap berat yang diharapkan dengan rumus:

$$\frac{\text{Massa ditimbang}}{\text{massa diharapkan}} \times \text{Jumlah spesimen}$$

2.2.3 Pengolahan Data

Setelah determinasi kuantitatif terhadap fosil foraminifera dilakukan, tahap ke tiga adalah pengolahan data. Kelimpahan fosil foraminifera planktonik dan bentonik digunakan untuk penghitungan rasio P/B. Rasio P/B menunjukkan persentase kelimpahan foraminifera planktonik terhadap seluruh kelimpahan foraminifera (jumlah planktonik dan bentonik). Secara matematis menurut Van Marle (1989), rasio P/B ditulis sebagai berikut:

$$\text{Rasio P/B} = P / (P+B) \times 100\%$$

dengan:

P = jumlah individu planktonik

B = jumlah individu bentonik

Klasifikasi paleobatimetri berdasarkan rasio P/B yang digunakan adalah klasifikasi Grimsdale dan Van Morkhoven (1955) yang ditunjukkan pada **Tabel 3**.

Tabel 3 Klasifikasi lingkungan berdasarkan rasio P/B Grimsdale dan Van Morkhoven (1955).

P/B %	Lingkungan Batimetri
< 20	Neritik Dalam

20 - 60	Neritik Tengah
40 - 70	Neritik Luar
70 - 95	Batial Atas
> 95	Batial Bawah

Dilakukan juga penentuan parameter ekologi dengan menggunakan *single fauna method* untuk penentuan intensitas *upwelling*, yaitu dengan menggunakan kelimpahan relatif *Globigerina bulloides* (Bé, 1977), semakin tinggi kelimpahan relatifnya maka semakin besar intensitas *upwelling* terjadi. Kelimpahan relatif dihitung dengan rumus Braver dan Zar (1977) dalam Noortiningsih dkk. (2008) sebagai berikut:

$$\frac{\text{Kelimpahan suatu jenis}}{\text{Kelimpahan seluruh jenis}} \times 100\%$$

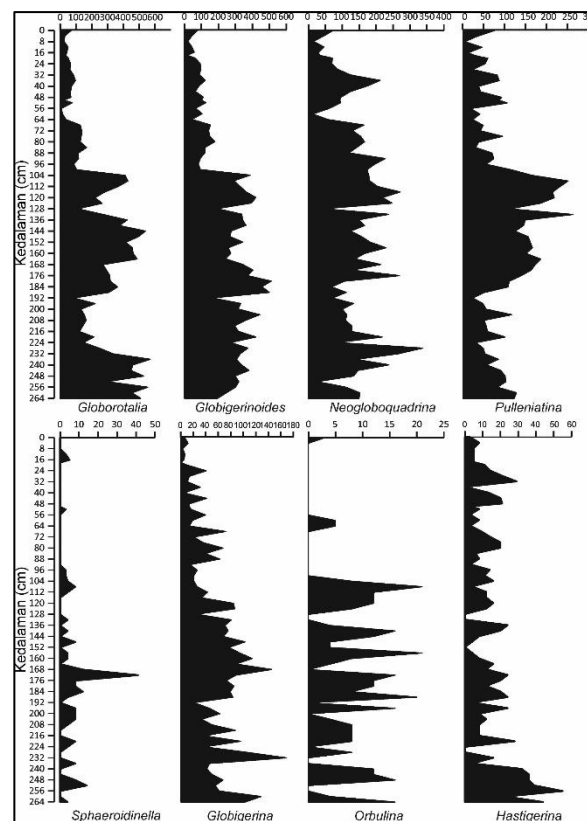
Metode *two or more species* digunakan untuk menentukan nilai paleoproduktivitas relatif dengan menggunakan kelimpahan relatif dua spesies dari genus *Pulleniatina* yaitu *Pulleniatina obliquiloculata* dan *Pulleniatina finalis* (Maryunani, 2009; Baohua dkk., 1997). Kedalaman termoklin didapat dengan rasio *thermocline dweller* yaitu *Neogloboquadrina dutertrei*, *Pulleniatina obliquiloculata*, *Globorotalia tumida tumida*, *Globorotalia crassaformis*, dan *Globorotalia tosaensis tosaensis*, terhadap *mixed-layer dweller* yaitu *Globigerinoides ruber*, *Globigerinoides trilobus trilobus*, *Globigerinoides trilobus sacculifer*, dan *Globigerinoides conglobatus* (Chen dkk., 1998; Huang dkk., 2002; Li dkk., 2005; Sato dkk., 2008; Gustiantini, 2018). Penentuan SPL relatif dilakukan menggunakan *whole fauna method* yang mengacu pada Boltovskoy dan Wright (1976) dan Haq dan Boersma (1998), menggunakan perbandingan kelimpahan relatif fauna tropis yaitu *Neogloboquadrina dutertrei*, *Globigerinoides ruber*, *Globigerinoides trilobus sacculifer*, *Pulleiniatina obliquilocuata*, *Globorotalia menardii*, *Globigerinoides trilobus trilobus*, dan *Sphaeroidinella dehiscens*, dengan fauna subtropis yaitu *Globigerina bulloides*, *Orbulina universa*, dan *Globorotalia scitula*. Semakin tinggi rasionya mengimplikasikan SPL relatif hangat dan sebaliknya.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Kelimpahan Foraminifera

Berdasarkan pengamatan di bawah mikroskop trinokuler variasi spesies foraminifera planktonik tidak begitu besar, dengan jumlah individu yang cukup besar. Jumlah individu foraminifera planktonik pada satu *split* kedalaman 264-265 cm hingga 104-105 cm mencapai 300 individu (kecuali kedalaman 224-225 cm, 216-217 cm, 212-213 cm, 208-209 cm, 200-201 cm, dan 192-193 cm). Jumlah individu foraminifera pada satu *split* kedalaman 100-101 cm hingga 0-1 cm berkurang hingga mencapai kurang dari 200 individu (**Gambar 5**). Rata-rata kelimpahan foraminifera planktonik setelah dinormalisasi sebesar 770 individu/10 gram. Terdapat delapan genus yang sering muncul pada setiap kedalaman, antara lain *Globorotalia*, *Globigerinoides*, *Neogloboquadrina*, *Pulleniatina*, *Sphaeroidinella*, *Globigerina*, *Orbulina*, dan

Hastigerina (**Gambar 3**). Secara total terdapat 22 spesies foraminifera planktonik pada inti batuan BS-05 yaitu *Globorotalia menardii cultrata*, *Globorotalia tumida tumida*, *Globigerinoides trilobus immaturus*, *Neogloboquadrina dutertrei blowi*, *Globigerinoides trilobus sacculifer*, *Pulleniatina obliquiloculata*, *Sphaeroidinella dehiscens*, *Globigerina bulloides*, *Neogloboquadrina dutertrei dutertrei*, *Orbulina universa*, *Pulleniatina finalis*, *Globigerinoides ruber*, *Globorotalia menardii menardii*, *Hastigerina siphonifera*, *Hastigerina calida*, *Globorotalia scitula*, *Globorotalia tosaensis tosaensis*, *Globigerinoides trilobus trilobus*, *Globigerinoides elongatus*, *Globigerinoides conglobatus*, *Globorotalia acostaensis pseudopima*, dan *Globorotalia crassaformis*.



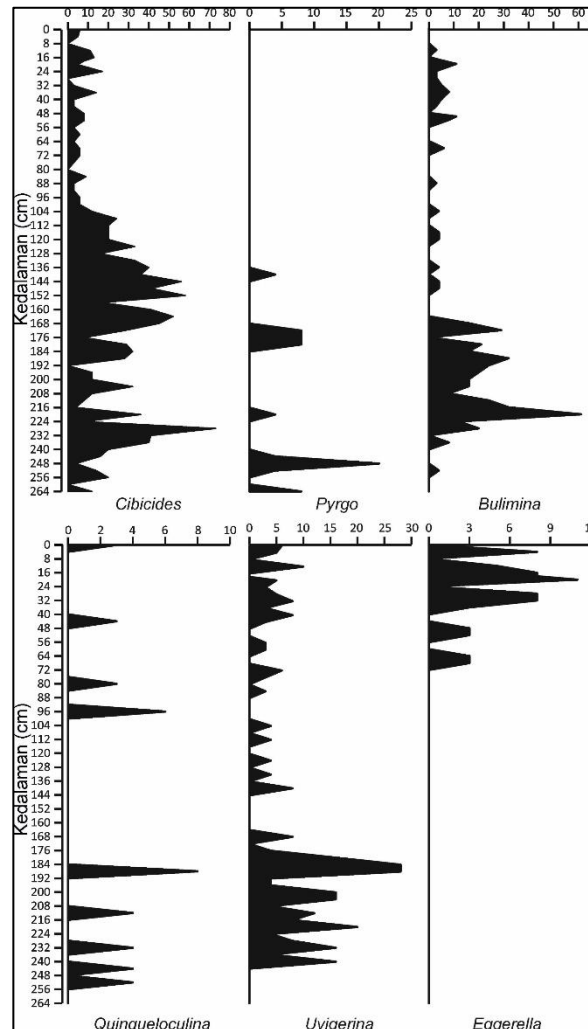
Gambar 3 Grafik kelimpahan delapan genus foraminifera planktonik inti batuan BS-05, sumbu x (horizontal) mewakili kelimpahan.

Berdasarkan pengamatan di bawah mikroskop trinokuler variasi spesies foraminifera bentonik kecil,

dengan jumlah individu yang sedikit. Jumlah individu foraminifera bentonik pada satu *split* secara

umum berjumlah sedikit, yaitu lebih sedikit dari 50 individu (**Gambar 5**). Rata-rata kelimpahan foraminifera bentonik setelah dinormalisasi adalah 33 individu/10 g. Terdapat enam genus yang sering muncul pada setiap kedalaman, antara lain *Cibicides*, *Pyrgo*, *Bulimina*, *Quinqueloculina*, *Uvigerina*, dan

Eggerella (**Gambar 4**). Secara total terdapat 7 spesies foraminifera bentonik pada inti batuan BS-05 yaitu *Cibicides kullenbergi*, *Pyrgo murrhina*, *Bulimina aculeata*, *Quinqueloculina seminula*, *Uvigerina peregrina*, *Cibicides wuellerstorfi*, dan *Eggerella bradyi*.

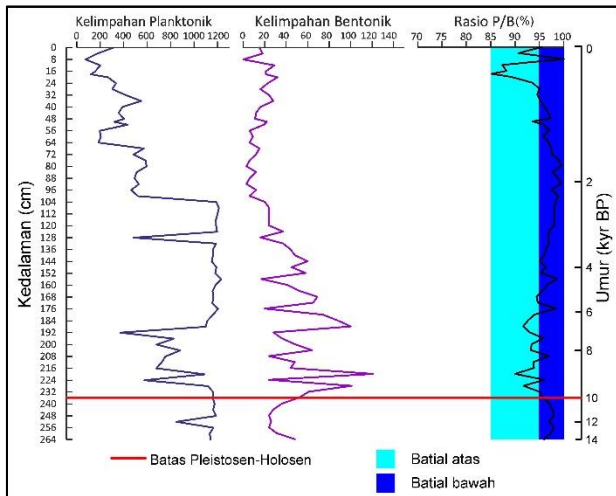


Gambar 4 Grafik kelimpahan enam genus foraminifera bentonik inti batuan BS-05, sumbu x (horizontal) mewakili kelimpahan.

3.2 Paleoekologi dan Paleoproduktivitas

Hasil penghitungan rasio P/B menghasilkan nilai rasio P/B terendah 85,21 (kedalaman 18 cm), tertinggi 100 (8 cm), dengan rata-rata 95,59. Nilai rasio P/B tersebut menandakan sampel inti batuan BS-05 terendapkan pada kisaran paleobatimetri batial atas hingga batial bawah menurut klasifikasi

Tipsword dkk. (1966). Hasil penghitungan rasio P/B ini selaras dengan *sub bottom profiler* geofisika tim peneliti BENTHIC yang menyatakan bahwa inti batuan BS-05 merupakan wilayah perairan *slope* dalam dengan kedalaman air laut lebih dalam dari 1.000 m (Troa, 2014).



Gambar 5 Kurva kelimpahan foraminifera planktonik dan bentonik dan rasio P/B.

Kondisi SPL relatif didapat dengan *whole fauna method* yang menggunakan perbandingan fauna tropis dan subtropis yang mengacu pada Boltovskoy dan Wright (1976); Haq dan Boersma (1998). Hasil penghitungan SPL relatif berupa kurva yang dapat dilihat pada **Gambar 6**. Kurva SPL relatif memiliki tren yang cenderung selaras dengan suhu dari perairan inti batuan GeoB 10042-1 dan GeoB 10043-2 yang digunakan Setiawan dkk. (2015) (**Gambar 7**). Kedalaman termoklin didapat dengan menggunakan metode *two or more species*, yang menggunakan rasio foraminifera *thermocline dweller* dibanding *mixed-layer dweller*. Hasil penghitungan kemudian diplot ke dalam kurva kedalaman termoklin (**Gambar 6**), dengan nilai kedalaman termoklin tinggi menandakan termoklin semakin tebal, yang berarti *mixed-layer* semakin tipis, yang menandakan suhu permukaan lebih dingin. **Gambar 6** menunjukkan hubungan kedalaman termoklin dan SPL relatif yang bertolak belakang, kedalaman termoklin mendalam diikuti SPL relatif yang meningkat.

Intensitas *upwelling* didapat dengan menggunakan *single fauna method*. Semakin tinggi kelimpahan relatif *Globigerina bulloides* menandakan semakin besar intensitas *upwelling* terjadi. Hasil penghitungan kemudian diplot ke dalam kurva *upwelling* (**Gambar 6**). Pada **Gambar 6** terlihat

tren *upwelling* berbanding terbalik dengan SPL relatif, pada kedalaman dengan *upwelling* tinggi, SPL relatif cenderung turun. Hal tersebut dapat diamati pada kedalaman 264 cm dan 56 cm, yang menjadi nilai puncak *upwelling* tertinggi).

Paleoproduktivitas relatif didapat dengan menggunakan *two or more species*, yaitu dengan menggunakan kelimpahan relatif dua spesies dari genus *Pulleniatina* yaitu *Pulleniatina obliquiloculata* dan *Pulleniatina finalis* (Maryunani, 2009; Baohua dkk., 1997). Semakin tinggi kelimpahan relatif *Pulleniatina* maka semakin besar paleoproduktivitas relatifnya. Hasil penghitungan kemudian diplot ke dalam kurva paleoproduktivitas (**Gambar 8**).

4. DISKUSI

Berdasarkan pengolahan data paleoekologi dan paleoproduktivitas sampel inti batuan BS-05, terjadi perubahan tren yang signifikan dalam rentangan waktu 14.000 tahun (Pleistosen) hingga saat ini. Perubahan tren ekologi dan produktivitas saling berkaitan erat satu sama lain, dan tercermin ke dalam susunan komunitas foraminifera pada inti batuan BS-05 yang mewakili daerah penelitian. Secara garis besar, terjadi perubahan tren parameter ekologi, dan produktivitas foraminifera setiap 2.000 tahun (**Gambar 9**). Berikut pembahasan perubahan paleoekologi dan paleoproduktivitas setiap 2.000 tahun:

14.000 hingga 12.000 tahun BP

Interval waktu ini mencakup kedalaman 264 cm hingga 252 cm. Secara ekologi, kondisi perairan pada dicirikan oleh termoklin dangkal, dengan SPL relatif dingin (**Gambar 9**). Berdasarkan dangkalnya termoklin dan tingginya aktivitas *upwelling*, diinterpretasikan pada interval ini peristiwa IOD positif mendominasi, dengan paleoproduktivitas dikendalikan oleh *upwelling*. Sebagai contoh, aktivitas *upwelling* tinggi pada kedalaman 260 cm yang meningkatkan paleoproduktivitas pada kedalaman tersebut.

12.000 hingga 10.000 tahun BP

Interval waktu ini mencakup kedalaman 251 cm hingga 236 cm. Berdasarkan umurnya, interval ini mencakup batas Pleistosen dan Holosen. Secara ekologi, kondisi perairan pada interval ini dicirikan oleh penghangatan SPL relatif, termoklin yang mendalam, dengan aktivitas *upwelling* yang melemah (**Gambar 9**). Berdasarkan pendalaman termoklin dan pelemahan aktivitas *upwelling*, diinterpretasikan pada interval ini, peristiwa IOD negatif mendominasi. Paleoproduktivitas menurun akibat turunya aktivitas *upwelling*.

10.000 hingga 8.000 tahun BP

Interval waktu ini mencakup kedalaman 235 cm hingga 204 cm. Berdasarkan umurnya, rentang waktu ini sudah masuk ke dalam Kala Holosen dan merupakan waktu setelah terjadinya peristiwa *Last Deglaciation* (Kuang dkk., 2021). Pada kedalaman 235 hingga 228 cm terdapat aktivitas *upwelling* yang tinggi yang disertai pendangkalan termoklin dan pendinginan SPL relatif (**Gambar 9**). Pendangkalan termoklin dan tingginya aktivitas *upwelling* menandakan dominasi IOD positif pada kedalaman ini. Pada kedalaman 203 hingga 192 terjadi penurunan aktivitas *upwelling* dan pendalaman termoklin yang diikuti naiknya SPL relatif. Pendalaman termoklin dan penurunan aktivitas *upwelling* menandakan dominasi IOD negatif. Paleoproduktivitas bersifat fluktuatif kemungkinan dikarenakan adanya perubahan faktor pengontrol produktivitas setelah terbukanya Selat Sunda. Berdasarkan penelitian Xu dkk. (2017), setelah terbukanya Selat Sunda (deglasiasi), masukan material terigen dari Laut Jawa yang

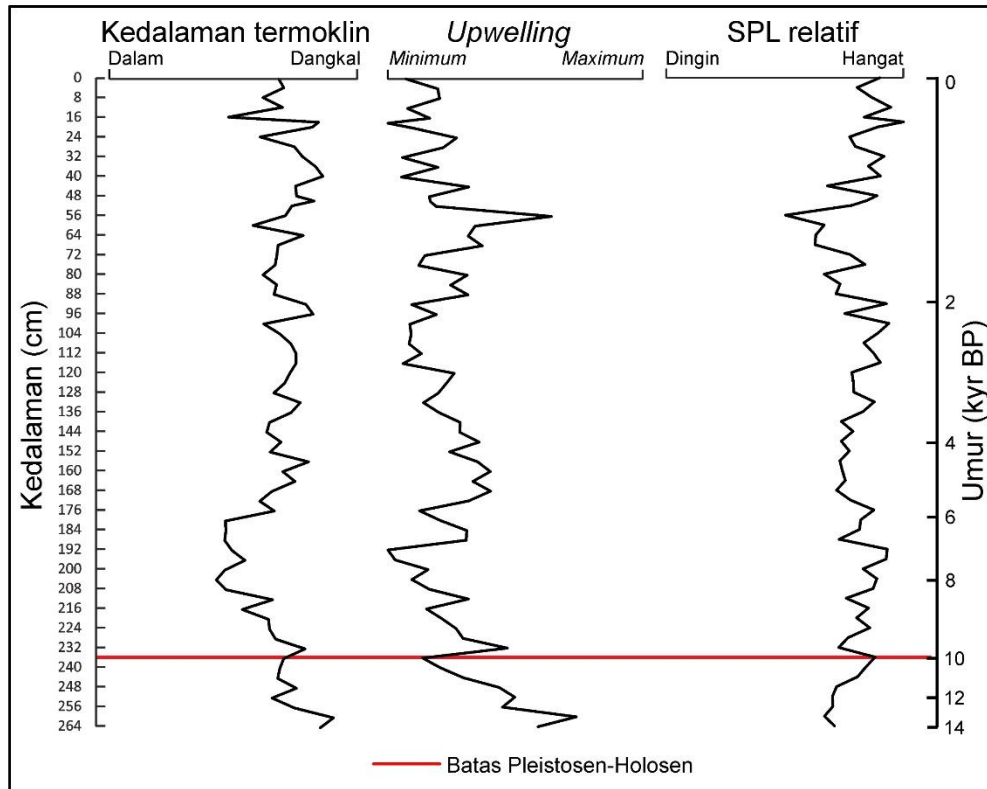
dipicu kenaikan curah hujan menjadi pengontrol produktivitas Samudra Hindia bagian timur selama Holosen. Hal ini terlihat pada kedalaman 204 cm.

8.000 hingga 6.000 tahun BP

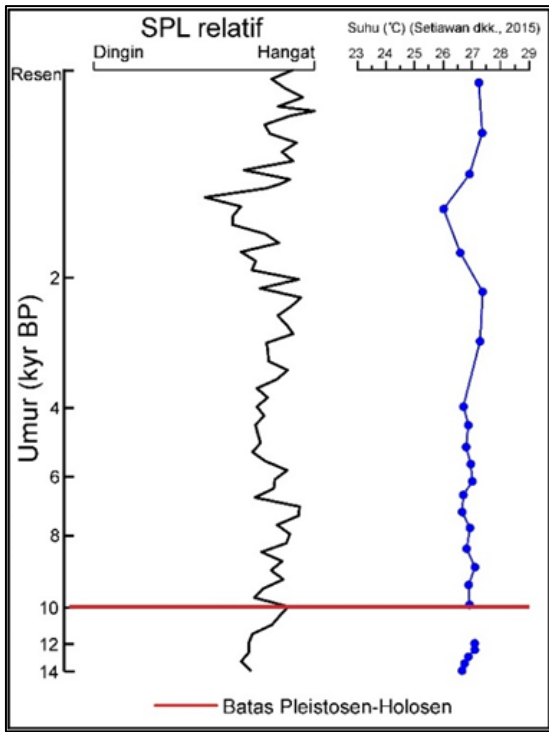
Interval waktu ini mencakup kedalaman 203 cm hingga 180 cm. Berdasarkan umurnya, interval ini masuk ke dalam Kala Holosen. Secara umum, interval waktu ini memiliki kedalaman termoklin dalam, dengan SPL relatif hangat, dan aktivitas *upwelling* yang lemah, yang menandakan dominasi IOD negatif. Pada interval kedalaman dengan IOD negatif, paleoproduktivitas cenderung kecil. Pada kedalaman 189-184 cm terjadi pendinginan SPL relatif dan peningkatan aktivitas *upwelling* menandakan kembali dominannya IOD positif pada kedalaman tersebut, dan disertai peningkatan paleoproduktivitas (**Gambar 9**). Hal ini mengindikasikan bahwa *upwelling* yang disebabkan oleh IOD positif tetap memegang peran penting dalam produktivitas foraminifera pada Kala Holosen.

6.000 hingga 4.000 tahun BP

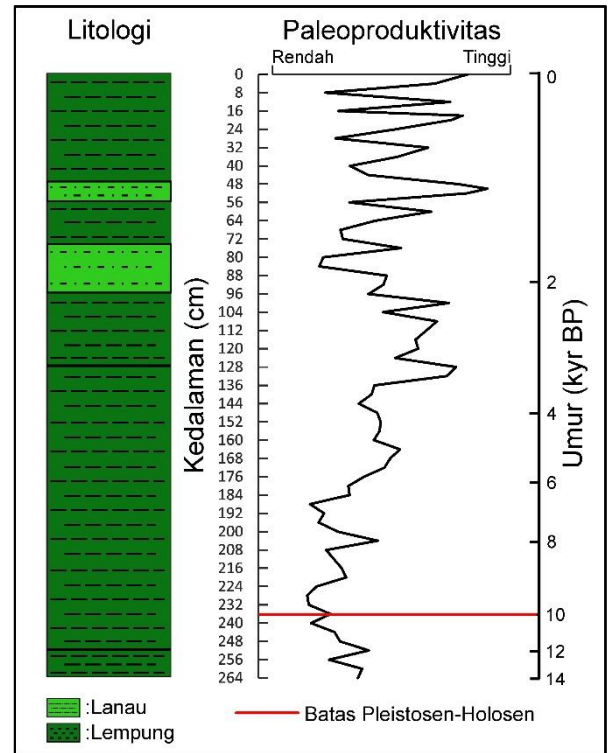
Interval waktu ini mencakup kedalaman 179 cm hingga 148 cm. Berdasarkan umurnya, interval ini masuk ke dalam Kala Holosen. Pada interval ini aktivitas *upwelling* awalnya rendah namun kemudian meningkat (**Gambar 9**). Termoklin mengalami pendangkalan dari yang awalnya dalam. SPL relatif mengalami pendinginan. Berdasarkan dangkalnya termoklin dan tingginya aktivitas *upwelling*, diperkirakan IOD positif kembali mendominasi dan meningkatkan paleoproduktivitas



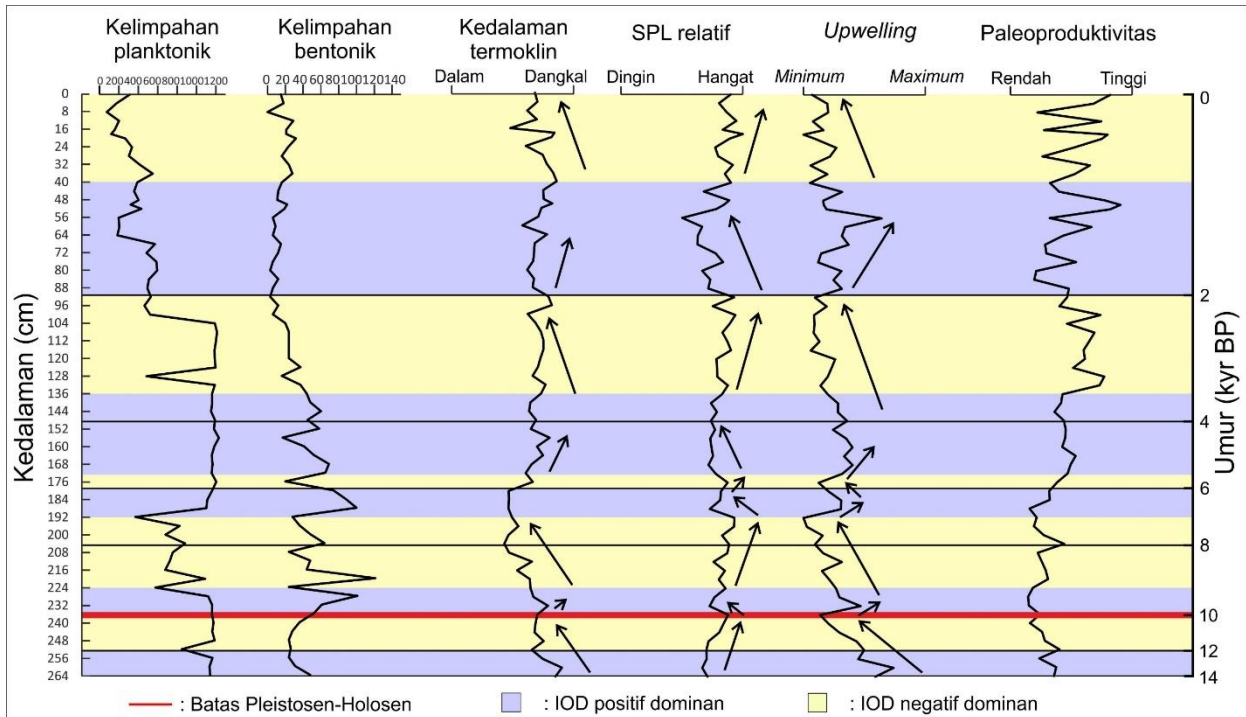
Gambar 6 Kurva kedalaman termoklin berdasarkan rasio *thermocline dweller* (*Neogloboquadrina dutertrei* subssp., *Pulleniatina obliquiloculata*, *Globorotalia tumida tumida*, *Globorotalia crassaformis*, dan *Globorotalia tosaensis tosaensis*) banding *mixed-layer dweller* (*Globigerinoides ruber*, *Globigerinoides trilobus trilobus*, *Globigerinoides trilobus sacculifer*, dan *Globigerinoides conglobatus*), upwelling berdasarkan kelimpahan relatif *Globigerina bulloides*, dan SPL relatif berdasarkan rasio fauna tropis (*Neogloboquadrina dutertrei* subssp., *Globigerinoides ruber*, *Globigerinoides trilobus sacculifer*, *Pulleiniatina obliquilocuata*, *Globorotalia menardii*, *Globigerinoides trilobus trilobus*, dan *Sphaeroidinella dehiscens*) banding spesies fauna subtropis (*Globigerina bulloides*, *Orbulina universa*, dan *Globorotalia scitula*) pada inti batuan BS-05.



Gambar 7 Kondisi SPL relatif lokasi inti batuan BS-05 (kurva hitam) dikomparasikan dengan temperatur perairan inti batuan GeoB 10042-1 dan GeoB 10043-2 oleh Setiawan dkk. 2015) (kurva biru).



Gambar 8 Kurva paleoproduktivitas sampel inti batuan BS-05 menggunakan kelimpahan relatif genus *Pulleniatina*.

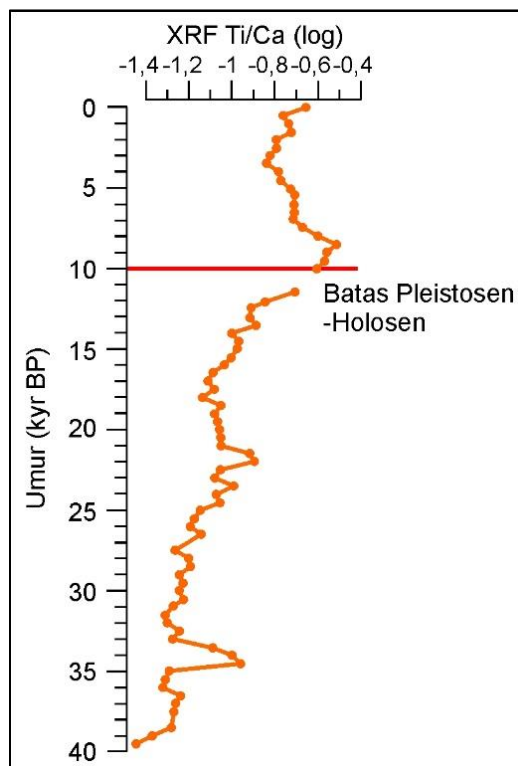


Gambar 9 Pembagian parameter paleoekologi dan paleoproduktivitas inti batuan BS-05 berdasarkan

interval 2.000 tahun dan kaitannya dengan peristiwa IOD.

4.000 hingga 2.000 tahun BP

Interval waktu ini mencakup kedalaman 147 cm hingga 92 cm. Berdasarkan umurnya, interval ini masuk ke dalam Kala Holosen. Kondisi perairan pada interval ini dicirikan oleh termoklin yang mendalam yang disertai dengan SPL relatif menghangat, dengan aktivitas *upwelling* cenderung melemah (**Gambar 9**). Pendalaman termoklin dan turunnya intensitas *upwelling* menandakan dominasi IOD negatif pada interval umur ini. Paleoproduktivitas cenderung meningkat dibanding sebelumnya meskipun aktivitas *upwelling* menurun, sehingga kemungkinan kembali didominasi oleh masukan material terigen. Hal ini selaras dengan kenaikan rasio Ti/Ca menurut penelitian Setiawan dkk. (2015) di Selat Sunda dari 40.000 hingga 0 tahun BP yang menunjukkan peningkatan masukan material terigen setelah terbukanya Selat Sunda pada 10.000 BP (**Gambar 10**).



Gambar 10 Kurva rasio Ti/Ca inti batuan GeoB 10042-1 dan GeoB 10043-3 daerah Selat Sunda dari 40.000 hingga 0 tahun BP yang menunjukkan peningkatan masukan material terigen setelah terbukanya Selat Sunda pada 10.000 BP (digambar ulang berdasarkan Setiawan dkk., 2015).

2.000 tahun BP hingga saat ini (resen)

Interval waktu ini mencakup kedalaman 91 cm hingga 0 cm dan berumur Holosen. Kondisi perairan pada interval ini dicirikan oleh kedalaman termoklin yang cenderung fluktuatif, pada **Gambar 9** ditunjukkan termoklin mendangkal dari kedalaman 91 cm dengan SPL relatif mendingin dan mencapai kondisi terdingin pada kedalaman 56 cm. Pendinginan ini juga didukung dengan adanya peningkatan aktivitas *upwelling* pada kedalaman tersebut. Pendangkalan termoklin dan peningkatan aktivitas *upwelling* menandakan IOD positif kembali mendominasi periode ini. Paleoproduktivitas pada kedalaman 91-56 cm juga terlihat mengalami kenaikan yang disebabkan oleh peningkatan aktivitas *upwelling*. Dari kedalaman 55 hingga 0 cm, termoklin kembali mendalam dan diikuti oleh penghangatan SPL relatif. Aktivitas *upwelling* semakin berkurang sehingga paleoproduktivitas diinterpretasikan kembali dikontrol oleh masukan material terigen. Pendalaman termoklin dan turunnya aktivitas *upwelling* mengindikasikan IOD negatif kembali mendominasi.

5. KESIMPULAN

Inti batuan BS-05 di Selat Sunda merupakan perairan tropis dengan parameter ekologi yang mengalami perubahan sebelum dan sesudah deglasiasi. Sebelum deglasiasi (akhir Pleistosen), SPL relatif lebih dingin, aktivitas *upwelling* tinggi, dan kedalaman termoklin dangkal, dengan paleoproduktivitas sepenuhnya dikendalikan oleh IOD positif. Setelah deglasiasi (Holosen), SPL menjadi lebih hangat, dengan aktivitas *upwelling* dan kedalaman termoklin yang mengalami fluktuasi yang seturut siklus IOD negatif dan IOD positif. Berbeda dengan sebelum Holosen, perubahan dominasi IOD positif atau negatif ini saling berkontribusi terhadap tingginya paleoproduktivitas foraminifera.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada BRSDMKP KKP khususnya Bapak Rainer Arief Troa dan Bapak Eko Triarso, BBSPGL, PPG BRIN khususnya Bapak Marfasran Hendrizan dan Ibu Rina Zuraida, dan FIO Republik Rakyat Cina yang

telah memberikan izin penggunaan data BENTHIC Cruise 2014 yaitu inti batuan BS-05. Kami juga berterima kasih kepada awak kapal penelitian Geomarin III atas bantuannya dalam pengambilan inti batuan BS-05.

REFERENSI

- Abram, N.J., Gagan, M.K., Liu, Z., Hantoro, W.S., McCulloch, M.T., dan Suwargadi, B.W. (2007): Seasonal characteristics of the Indian Ocean Dipole during the Holocene Epoch, *Nature*, **445**, 299–302.
- Allan, R. J., Chambers, D., Drosowsky, W., Hendon, H., Latif, M., dan Nicholls, N. (2001): Is there an Indian Ocean dipole and is it independent of the El Niño-Southern Oscillation? *CLIVAR Exchanges*, **6**, 18–22
- Ashok, K., Guan, Z., dan Yamagata, T. (2003): A look at the relationship between the ENSO and the Indian Ocean Dipole, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **81**, 41–56.
- Baohua, L., Zhimin, J., dan Pinxian, W. (1997): Pulleniatina obliquiloculata as a paleoceanographic indication in the southern Okinawa Trough during the last 20,000 years, *Science*, **80**, 59–69.
- Baquero-Bernal, A., Latif, M., dan Legutke, S. (2002): On dipolelike variability of sea surface temperature in the tropical Indian Ocean, *Journal of Climate*, **15**, 1358–1368.
- Bé, A.W.H. (1977): An ecological, zoogeographic and taxonomic review of recent planktonic foraminifera, *Oceanic Micropaleontology*, **1**, 1–100.
- Behera, S. K., Luo, J. J., Masson, S., Rao, S. A., Sakuma, H., dan Yamagata, T. (2006): A CGCM study on the interaction between IOD and ENSO, *Journal of Climate*, **19**, 1608–1705.
- Blow, W.H. (1969): Late Middle Eocene to Recent planktonic foraminiferal biostratigraphy, *Proceedings of the 1st International Conference on Planktonic Microfossils*, Jenewa, Swiss, 199–422.
- Bolli, H.M., Saunders, J.B., dan Perch-Nielsen, K. (1985): *Plankton Stratigraphy Vol. 1*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Boltovskoy, E. dan Wright, R. (1976): *Recent Foraminifera*, Berlin, Springer Science Business Media.
- Cai, W., Wu, L., Lengaigne, M., Li, T., McGregor, S., dan Kug, J. S. (2019): *Pantropical climate interactions*, *Science*, **363**, 4236.
- Chen, M.T., Ho, H.W., Lai, T.D., Zheng, L.F., Miao, Q.M., Shea, K.S., Chen, M.P., Wang, P.C., Wang, P.X., Wei, K.Y., dan Huang, C.Y. (1998): Recent planktonic foraminifers and their relationships to surface ocean hydrography of the South China Sea. *Mar. Geol.*, **146**, 173–190.
- Dennison, J. M. dan Hay, W. W. (1967): Estimating the needed sampling area for subaquatic ecologic studies, *Journal of Paleontology*, **41**, 706–708.
- DiNezio, P. N., dan Tierney, J.E. (2013): The effect of sea level on glacial Indo-Pacific climate, *Nat. Geosci.*, **6**, 485–491.
- Dommenget, D. (2011): An objective analysis of the observed spatial structure of the tropical Indian Ocean SST variability, *Climate Dynamics*, **36**, 2129–2145.
- Fischer, A. S., Terray, P., Guilyardi, E., Gualdi, S., dan Delecluse, P. (2005): Two independent triggers for the Indian Ocean Dipole/Zonal Mode in a coupled GCM, *J. Clim.*, **18**, 3428–3449.
- Gingele, F.X., Deckker, P.D., dan Hillenbrand, C.D. (2001): Clay mineral distribution in surface sediments between Indonesia and NW Australia—source and transport by ocean currents, *Mar. Geol.*, **179**, 135–146.
- Griffiths, M.L., Drysdale, R.N., Gagan, M.K., Zhao J.X., Ayliffe, L.K., Hellstrom J.C., Hantoro W.S., Frisia S., Feng Y.X., Cartwright, I., St. Pierre, E., Fischer M.J., dan Suwargadi B.W. (2009): Increasing Australian-Indonesian monsoon rainfall linked to early Holocene sea-level rise, *Nat. Geosci.*, **2**, 636–639.
- Griffiths, M.L., Drysdale, R.N., Gagan M.K., Zhao J.X., Hellstrom J.C., Ayliffe, L.K., dan Hantoro W.S. (2013): Abrupt increase in east Indonesian rainfall from flooding of the Sunda Shelf ~9500 years ago, *Quat. Sci. Rev.*, **74**, 273–279.

- Grimsdale, T.F. dan Van Morkhoven F.P.C.M. (1955): The ratio between pelagic and benthonic foraminifera as a means of estimating depth of deposition of sedimentary rocks, *Proceedings 4th World Petroleum Congress*, 473-491.
- Gustiantini, L. (2018): *Paleoclimate Reconstructions by Multiproxy Approaches in the Halmahera Sea Since the Late Pleistocene-Holocene*, Disertasi Program Doktor, Institut Teknologi Bandung.
- Hanebuth, T., Stattegger, K., dan Grootes, P.M. (2000): Rapid flooding of the Sunda Shelf: A Late-Glacial sea-level record, *Science*, **288**, 1033-1035.
- Haq, B. U. dan Boersma A. (1998): *Introduction to Marine Micropaleontology*, Amsterdam, Elsevier.
- Huang, B. dan Kinter, J. L. (2002): Interannual variability in the tropical Indian Ocean, *Journal of Geophysical Research*, **107**, 3199.
- Huang, B.Q., Jian, Z.M., Cheng, X.R., dan Wang, P.X. (2002): Foraminiferal responses to upwelling variations in the South China Sea over the last 220000 years, *Marine Micropaleontology*, **47**, 1-15.
- Izumo, T., Vialard, J., Lengaigne, M., De Boyer Montegut, C., Behera, S. K., dan Luo, J. J. (2010): Influence of the state of the Indian Ocean Dipole on the following years El Niño, *Nature Geoscience*, **3**, 168-172.
- Jourdain, N. C., Lengaigne, M., Vialard, J., Izumo, T., dan Gupta, A. S. (2016): Further insights on the influence of the Indian Ocean di pole on the following year's ENSO from observations and CMIP5 models, *Journal of Climate*, **29**, 637-658.
- Kinter, I. L., Miyakoda, K., dan Yang, S. (2002): Recent change in the connection from the Asian monsoon to ENSO, *Journal of Climate*, **15**, 1203-1215.
- Kuang, X., Schenk, F., Smittenberg, R., Hällberg, P., dan Zhang, Q. (2021): Seasonal evolution differences of east Asian summer monsoon precipitation between Bølling-Allerød and younger Dryas periods, *Climatic Change*, **165**, 1-18.
- Kumar, K. K., Rajagopalan, B., dan Cane, M. A. (1999): On the weakening relationship between the indian monsoon and ENSO, *Science*, **284**, 2156-2159.
- Kwiatkowski, C., Prange, M., Varma, V., Steinke, S., Hebbeln, D., dan Mohtadi, M. (2015): Holocene variations of thermocline conditions in the eastern tropical Indian Ocean, *Quaternary Science Reviews*, **114**, 33-42.
- Li, B., Jian, Z., Li, Q., Tian, J., dan Wang, P. (2005): Paleooceanography of the South China Sea since the middle Miocene: evidence from planktonic foraminifera, *Mar. Micropaleontol.*, **54**, 49-62.
- Linsley, B.K., Rosenthal, Y., dan Oppo D.W. (2010): Holocene evolution of the Indonesian Throughflow and the western Pacific warm pool, *Nat. Geosci.*, **3**, 578-583.
- Loeblich, A.R. dan Tappan, H. (1988): *Foraminiferal Genera and Their Classification*, Berlin, Springer.
- Noortiningsih, Jalip, I. S., dan Handayani, S. (2008): Keanekaragaman makrozoobentos, meiofana dan foraminifera di Pantai Pasir Putih barat dan muara Sungai Cikamal Pangandaran, Jawa Barat, *VisVitalis*, **1**, 34-42.
- Maryunani, K.A. (2009): *Microfossil approached based on Cendrawasih Bay data, to interpreting and reconstructing Equatorial Western Pacific paleoclimate since Last Glacial (Late Pleistocene)*, Disertasi Program Doktor, Institut Teknologi Bandung.
- Pelejero, C., Kienast, M., Wang, L., dan Grimalt, J.O. (1999): The flooding of Sundaland during the last deglaciation: Imprints in hemipelagic sediments from the southern South China Sea, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **171**, 661-671.
- Sato, K., Oda, M., Chiyonobu, S., Kimoto, K., Domitsu, H., dan Ingle, J.C. (2008): Establishment of the western Pacific warm pool during the Pliocene: Evidence from planktic foraminifera, oxygen isotopes, and Mg/Ca ratios, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol.*

- Palaeoecol.*, **265**, 140–147.
- Setiawan, R.Y., Mohtadi, M., Southon, J., Groeneveld, J., Steinke, S., dan Hebbeln, D. (2015): The consequences of opening the Sunda Strait on the hydrography of the eastern tropical Indian Ocean, *Paleoceanography*, **30**, 1358-1372.
- Tipson, H. L., Setzer, F. M., dan Smith F. M. Jr. (1966): Interpretation of depositional environment in gulf coast petroleum exploration from paleoecology and related stratigraphy, *Geol. Soc.*, **16**, 119-130.
- Tjia, H.D. (1980): The Sunda Shelf, SE Asia, *Z. Geomorphol.*, **24**, 405–427.
- Troa, R.A. (2014): *Laporan akhir kegiatan riset: analisis karakteristik sumber daya laut dalam di kawasan Samudra Hindia*, Jakarta, Keltibang Geodinamika dan Sumber Daya Laut Dalam – P3SDLP “GEODEEP”.
- Van Marle, L.J. (1989): *Benthic foraminifera from Banda Arc Region, Indonesia, and their paleobathymetric significance for geologic interpretations of the Late Cenozoic sedimentary record*, Amsterdam, Free University Press.
- Wang, H., Kumar, A., Murtugudde, R., Narapusetty, B., dan Seip, K. L. (2019): Covariations between the Indian Ocean dipole and ENSO: A modeling study, *Climate Dynamics*, **53**, 5743–5761.
- Webster, P.J., Moore, A.M., Loschnigg, J.P., dan Leben, R.R. (1999): Coupled ocean-atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997-98, *Nature*, **401**, 356-360.
- Wiener, C. E., Dijkstra, H. A., dan de Ruijter, W. P. M. (2017): The influence of the Indian Ocean on ENSO stability and flavor, *Journal of Climate*, **30**, 2601–2620.
- Xu, Y., Wang, L., Yin, X., Ye, X., Li, D., Liu, S., Shi, X., Troa, R.A., Zuraida, R., dan Triarso, E. (2017): The influence of the Sunda Strait opening on paleoenvironmental changes in the eastern Indian Ocean, *Journal of Asian Earth Sciences*, **146**, 402–411.
- Yamagata, T., Behera, S. K., Luo, J. J., Masson, S., Jury, M. R., dan Rao, S. A. (2004): Coupled ocean-atmosphere variability in the tropical Indian ocean, *Geophysical Monograph Series*, **147**, 189–211.
- Zhao, S., Jin, F. F., dan Stuecker, M. F. (2019): Improved predictability of the Indian Ocean Dipole using seasonally modulated ENSO forcing forecasts, *Geophysical Research Letters*, **46**, 9980–9990.
- Zhou, Q., Duan, W., Mu, M., dan Feng, R. (2015): Influence of positive and negative Indian Ocean Dipoles on ENSO via the Indonesian Throughflow: Results from sensitivity experiments, *Advances in Atmospheric Sciences*, **32**, 783–793.

Lampiran 2. Data Kelimpahan Spesies Foraminifera Bentonik Sampel BS-05.

Kedalaman (cm)	<i>Cibicides kullenbergi</i>	<i>Pyrgo murrhina</i>	<i>Bulimina aculeata</i>	<i>Quinqueloculina seminula</i>	<i>Uvigerina peregrina</i>	<i>Cibicides wuellerstorfi</i>	<i>Eggerella bradyi</i>	Jumlah bentonik
0 - 1	0	0	0	3	6	6	0	15
4 - 5	5	0	0	0	5	0	8	18
8 - 9	0	0	0	0	0	0	0	0
12 - 13	8	0	3	0	10	3	5	29
16 - 17	13	0	0	0	0	0	8	21
18 - 19	8	0	5	0	0	0	8	21
20 - 21	5	0	11	0	5	0	11	32
24 - 25	17	0	3	0	3	0	0	23
28 - 29	0	0	3	0	5	0	8	16
32 - 33	3	0	5	0	8	0	8	24
36 - 37	14	0	8	0	3	0	3	28
40 - 41	3	0	5	0	8	0	0	16
44 - 45	3	0	3	3	3	0	0	12
48 - 49	8	0	0	0	0	0	3	11
50 - 51	8	0	11	0	0	0	3	22
52 - 53	0	0	8	0	0	8	3	19
56 - 57	3	0	0	0	3	0	0	6
60 - 61	3	0	0	0	3	3	0	9
64 - 65	0	0	0	0	0	3	3	6
68 - 69	3	0	6	0	0	3	3	15
72 - 73	0	0	0	0	6	6	0	12
76 - 77	0	0	0	0	3	3	0	6
80 - 81	0	0	0	3	0	0	0	3
84 - 85	6	0	0	0	3	3	0	12
88 - 89	0	0	3	0	0	3	0	6
92 - 93	0	0	0	0	0	3	0	3
96 - 97	6	0	0	6	0	0	0	12
100 - 101	3	0	0	0	0	3	0	6
104 - 105	8	0	4	0	4	4	0	20
108 - 109	12	0	0	0	0	12	0	24
112 - 113	20	0	0	0	4	0	0	24
116 - 117	12	0	4	0	0	8	0	24
120 - 121	16	0	4	0	0	4	0	24
124 - 125	29	0	0	0	4	4	0	37
128 - 129	16	0	0	0	0	0	0	16
132 - 133	33	0	0	0	4	0	0	37
136 - 137	36	0	4	0	0	4	0	44
140 - 141	36	4	0	0	8	0	0	48
144 - 145	48	0	4	0	0	8	0	60
148 - 149	41	0	4	0	0	0	0	45
152 - 153	58	0	0	0	0	0	0	58
156 - 157	17	0	0	0	0	0	0	17
160 - 161	41	0	0	0	0	0	0	41

Lampiran 2. (Lanjutan)

Kedalaman (cm)	<i>Cibicides kullenbergi</i>	<i>Pyrgo murrhina</i>	<i>Bulimina aculeata</i>	<i>Quinqueloculina seminula</i>	<i>Uvigerina peregrina</i>	<i>Cibicides wuellerstorfi</i>	<i>Eggerella bradyi</i>	Jumlah bentonik
164 - 165	40	0	0	0	0	12	0	52
168 - 169	37	0	16	0	8	8	0	69
172 - 173	20	8	29	0	0	8	0	65
176 - 177	4	8	0	0	4	4	0	20
180 - 181	21	8	21	0	16	8	0	74
184 - 185	28	0	16	0	28	4	0	76
188 - 189	20	0	32	8	28	8	0	96
192 - 193	0	0	24	0	4	0	0	28
196 - 197	8	0	20	0	4	4	0	36
200 - 201	8	0	16	0	16	4	0	44
204 - 205	28	0	16	0	16	4	0	64
208 - 209	12	0	8	0	4	0	0	24
212 - 213	8	0	24	4	12	0	0	48
216 - 217	0	0	32	0	8	4	0	44
220 - 221	16	4	61	0	20	20	0	121
224 - 225	4	0	12	0	4	4	0	24
228 - 229	73	0	20	0	8	0	0	101
232 - 233	41	0	0	4	16	0	0	61
236 - 237	36	0	8	0	4	4	0	52
240 - 241	20	0	0	0	16	0	0	36
244 - 245	16	4	0	4	0	0	0	24
248 - 249	4	20	0	0	0	0	0	24
252 - 253	14	4	4	4	0	0	0	26
256 - 257	20	0	0	0	0	0	0	20
260 - 261	0	0	0	0	0	0	0	0
264 - 265	12	8	0	0	0	0	0	20