

DISTRIBUSI FORAMINIFERA DI LAUT HALMAHERA DARI GLASIAL AKHIR SAMPAI RESEN

FORAMINIFERAL DISTRIBUTION SINCE THE LAST GLACIAL UNTIL RECENT IN HALMAHERA SEA

Gustiantini, L¹., Maryunani, K. A. ², Zuraida, R¹., Kissel, C. ³, Bassinot, F. ³, dan Zaim, Y. ²

¹Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan, Jl. Dr. Junjuran no. 236, Bandung – 40174

²Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha no. 10, Bandung – 40132

³Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSC), Avenue de la Terrasse, 91198 Gif-sur-Yvette Cedex, France

Diterima : 23-12-2014, Disetujui : 22-03-2015

ABSTRAK

Mikrofauna foraminifera telah banyak digunakan sebagai proksi dalam penelitian paleoseanografi dan perubahan iklim purba. Kelimpahan dan komposisi kimia cangkang foraminifera merekam berbagai informasi yang dapat diinterpretasi berkaitan dengan perubahan lingkungan berdasarkan parameter-parameter paleoseanografi. Paleoseanografi Laut Halmahera sangat penting untuk dikaji karena berpengaruh terhadap dinamika iklim Indonesia dan iklim global. Perubahan-perubahan parameter oseanografi tersebut mempengaruhi sirkulasi arus global dan interaksi antara air-udara yang berperan terhadap penyebaran uap air ke lintang tinggi. Oleh karena itu tujuan penelitian ini adalah mempelajari distribusi foraminifera untuk rekonstruksi perubahan paleoseanografi di Laut Halmahera dan sekitarnya. Data foraminifera ini didukung dengan pemodelan umur dan rekonstruksi isotop stratigrafi berdasarkan analisis $\delta^{18}\text{O}$ *G. ruber* dan C^{14} radiokarbon dating. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kelimpahan foraminifera di Laut Halmahera sangat dipengaruhi oleh iklim global. Kelimpahan foraminifera terutama didominasi oleh *G. ruber*, *G. bulloides*, *P. obliqueloculata*, *N. dutertrei*, dan *G. menardii* dari jenis planktonic. Sedangkan jenis bentik didominasi oleh *Bulimina* spp., *Bolivinita quadrilatera*, *Bolivina* spp., dan *Uvigerina* spp. Biozonasi foraminifera menunjukkan korelasi yang sangat baik dengan data $\delta^{18}\text{O}$ dan mencerminkan perubahan – perubahan iklim di masa lalu yang terjadi sejak 50.000 tahun yang lalu antara lain glasial akhir yang berlangsung sejak zona 1 - 4b, LGM (subzone 4b), deglasiasi (subzona 4c), kondisi seperti YD dari bumi bagian utara atau ACR dari bumi bagian selatan pada awal zona 5, interglasial (pertengahan zona 5), dan Mid Holosen Maksimum pada pertengahan subzona 5a.

Kata kunci: Distribusi foraminifera, paleoseanografi, isotop oksigen, perubahan iklim global, Laut Halmahera, .

ABSTRACT

*Microfauna foraminifera has been widely used as a potential proxy for paleoceanography and paleoclimatological changes. Its assemblages and its test geochemical composition preserve important data that could interpret various oceanographic parameters related to the paleoenvironmental changes. The paleoceanography dynamic of Halmahera sea is very important to be studied due to its great impact to Indonesian and global climate. The changes of its oceanographic parameters influence the thermohaline circulation and the air-sea interaction that contribute to the water favour distribution to the high latitudes. Therefore this research purpose is to analyze the foraminiferal distribution in order to reconstruct the paleoceanography changes of Halmahera sea and surrounded. This foraminiferal study is supported by the age model reconstruction and isotope stratigraphy analysis based on $\delta^{18}\text{O}$ *G. ruber* and ^{14}C dating. The result suggests that foraminiferal assemblage was influenced by global climate changes. Planktonic foraminifera is dominated by *G. ruber*, *G. bulloides*, *P. obliqueloculata*, *N. dutertrei*, and *G. menardii*. Benthic foraminifera is dominated by *Bulimina* spp., *Bolivinita quadrilatera*, *Bolivina* spp., and *Uvigerina* spp. Foraminiferal biozonation indicates coherent correlation with $\delta^{18}\text{O}$ record, and reflects global paleoclimatic changes that occurred since the 50 ka BP. Those paleoclimatic changes are last glacial (zone 1 - subzone 4b), LGM (zone 4b), deglaciation that was started from subzone 4c, condition of YD like of Northern Hemisphere climate or ACR like of the Southern Hemisphere climate (the beginning of zone 5), interglacial (middle of zone 5), and Mid Holocene Maximum at the middle of subzone 5a.*

Keywords: Foraminiferal distribution, paleoceanography, oxygen isotope, global climate changes, Halmahera sea, .

PENDAHULUAN

Foraminifera kecil merupakan salah satu proksi yang cukup potensial untuk penelitian paleoekologi, paleoklimatologi dan paleoseanografi karena sensitif terhadap perubahan lingkungan. Kajian tentang foraminifera sebagai proksi untuk rekonstruksi iklim global telah banyak dilakukan baik melalui kelimpahan maupun analisis komposisi kimia cangkangnya (Barmawidjaya, drr., 1993; Pflaumann dan Jian, 1999; Drinia, drr., 2003, Wang, drr., 2003; Spooner, drr., 2005; Murgese dan de Decker, 2007, Tedesco, drr., 2007; Maryunani, 2009; Zuraida, drr., 2009; Mohtadi, drr., 2011; Sijinkumar, drr., 2011; Ding, drr., 2013).

Laut Halmahera adalah salah satu perairan yang cukup penting bagi perkembangan iklim Indonesia khususnya dan iklim dunia umumnya. Sebagai bagian dari *Western Pasific Warm Pool* (WPWP), maka Laut ini juga termasuk pusat terjadinya konveksi panas yang akan didistribusikan ke lintang tinggi melalui interaksi antara laut dan atmosfer, serta termasuk area yang sangat dipengaruhi oleh sirkulasi ENSO. Selain itu Laut Halmahera juga dilewati oleh cabang dari sistem arus laut global (Sirkulasi termohalin), yang melewati perairan Indonesia dan dinamakan Arus lintas Indonesia (Arlindo). Dinamika sirkulasi termohalin ini sangat mempengaruhi dinamika iklim global, karena intensitas panas yang disebarkan mempengaruhi temperatur dan curah hujan di lautan dan daratan di sekitarnya. Penelitian terdahulu telah membuktikan bahwa melemahnya aliran sirkulasi termohalin telah menyebabkan perubahan iklim ekstrem yaitu peristiwa yang dikenal dengan *Heinrich Event* (HE) terutama HE 3 – 5 (Zuraida, drr., 2009). Oleh karena itu penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mempelajari distribusi foraminifera sehingga dapat mengkaji kondisi paleoseanografi Laut Halmahera yang terjadi sejak 50.000 tahun yang lalu.

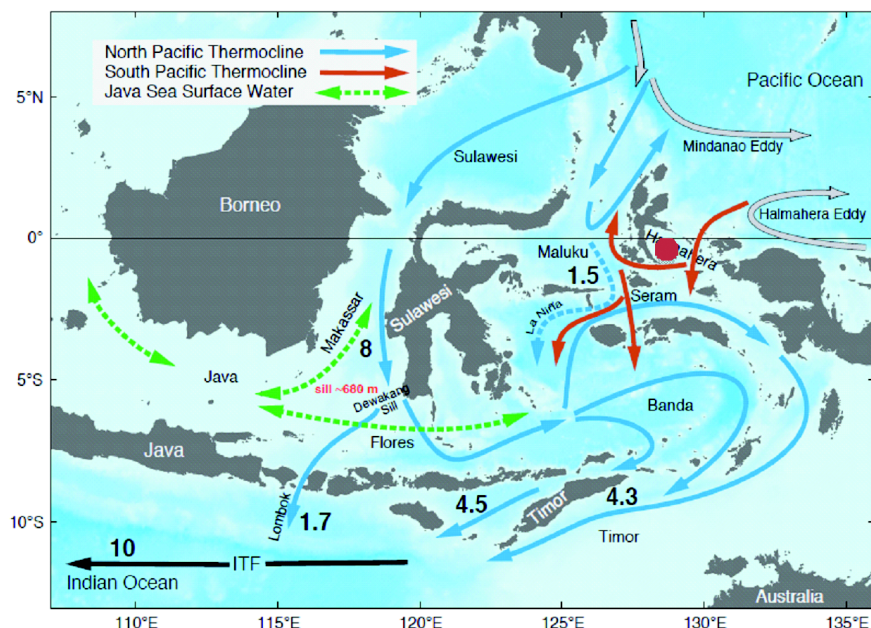
METODE

Penelitian dilakukan terhadap sebuah contoh bor sedimen sepanjang 38,91m (MD10 3339, atau disebut juga MD3339) dari Laut Halmahera pada kedalaman 1919m, dan posisi geografis 00°26,67' LS dan 128°50,33' BT (Gambar 1). Bor sedimen ini diambil dengan menggunakan penginti hisap raksasa CALYPSO dalam survei MONOCIR 2 (kerjasama penelitian antara Indonesia, Perancis dan Cina) pada tahun 2010. Pada bor sedimen tersebut diambil sebagian kecil sampel (10cc) dengan metode *syringe* secara sistematis setiap 30cm sampai kedalaman 30m. Sampel sedimen ditimbang sebelum dan sesudah dikeringkan sehingga diperoleh berat basah dan berat kering yang diperlukan untuk perhitungan densitasnya.

Sampel untuk analisis mikrofauna kemudian direndam, dicuci dalam ayakan, dan dikeringkan. Analisis foraminifera menggunakan sampel hasil cucian dari ayakan berukuran > 150 μ m dengan menjentik sekitar 300 spesimen. Kemudian dideterminasi mengacu pada Bolli, drr., (1985), Loeblich dan Tappan (1994), van Marle, (1991), dan Holbourn, drr, 2013.

Perhitungan pemodelan umur

Perhitungan pemodelan umur dilakukan dengan mengkorelasi nilai $\delta^{18}\text{O}$ plankton *Globigerinoides ruber* dari bor MD10-3339 dengan data $\delta^{18}\text{O}$ *G. ruber* pada bor MD01-2378 dari Laut Timor (Zuraida, drr., 2009). Pemodelan umur juga dikombinasikan dengan analisis penanggalan



Gambar 1. Posisi bor sedimen MD3339 (titik merah) dan jalur Arus lintas Indonesia (Gordon, 2005).

karbon 14 (dating ^{14}C) dari cangkang foraminifera planktonik (*G. ruber*, *G. trilobus*, *G. sacculifer*, *G. immaturus*, dan *G. bulloides*) yang dilakukan terhadap 4 sampel terpilih (kedalaman 390 cm, 690 cm, 1.650 cm, dan 2.550 cm) berdasarkan variasi isotop. Analisis ini dilakukan dengan menggunakan alat spektrometer massa ARTEMIS di laboratorium LMC14 (Laboratoire de mesure du Carbone 14), CEA-Saclay, Perancis. *Reservoir age* adalah 480 tahun untuk sedimen laut berumur lebih muda dari 13.000 tahun BP, dan 630 tahun untuk sedimen laut berumur lebih tua dari 13.000 tahun BP (Bolliet, drr., 2011).

Analisis oksigen isotop

Untuk analisis ini menggunakan 16 spesimen foraminifera planktonik *G. ruber* (60 - 100 μg) dari sampel sedimen berukuran 250 μm dan 315 μm . Cangkang tersebut kemudian direndam dalam gelas berisi larutan methanol, dan ditempatkan dalam bak ultrasonik untuk menghilangkan pengotor lempung. Selanjutnya cangkang dikeringkan dan dibakar pada suhu 380 $^{\circ}\text{C}$ untuk menghilangkan material organik. Kemudian perhitungan kandungan oksigen isotop dilakukan dengan menggunakan spektrometer massa VG-Optima Dual Inlet yang berada di *Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement* (LSCE), Perancis.

HASIL PENELITIAN

Kandungan mikrofauna foraminifera sangat berlimpah dengan kelimpahan rata-rata per sampel adalah 1158 spesimen/gr berat kering sedimen. Total foraminifera terdiri dari 34 spesies foraminifera planktonik, dan lebih dari 58 spesies benthik. Spesies-spesies yang mendominasi dan sering hadir antara lain *Globigerinoides ruber*, *Globigerinoides bulloides*, *Pulleniatina obliqueloculata*, dan *Neogloboquadrina dutertrei*

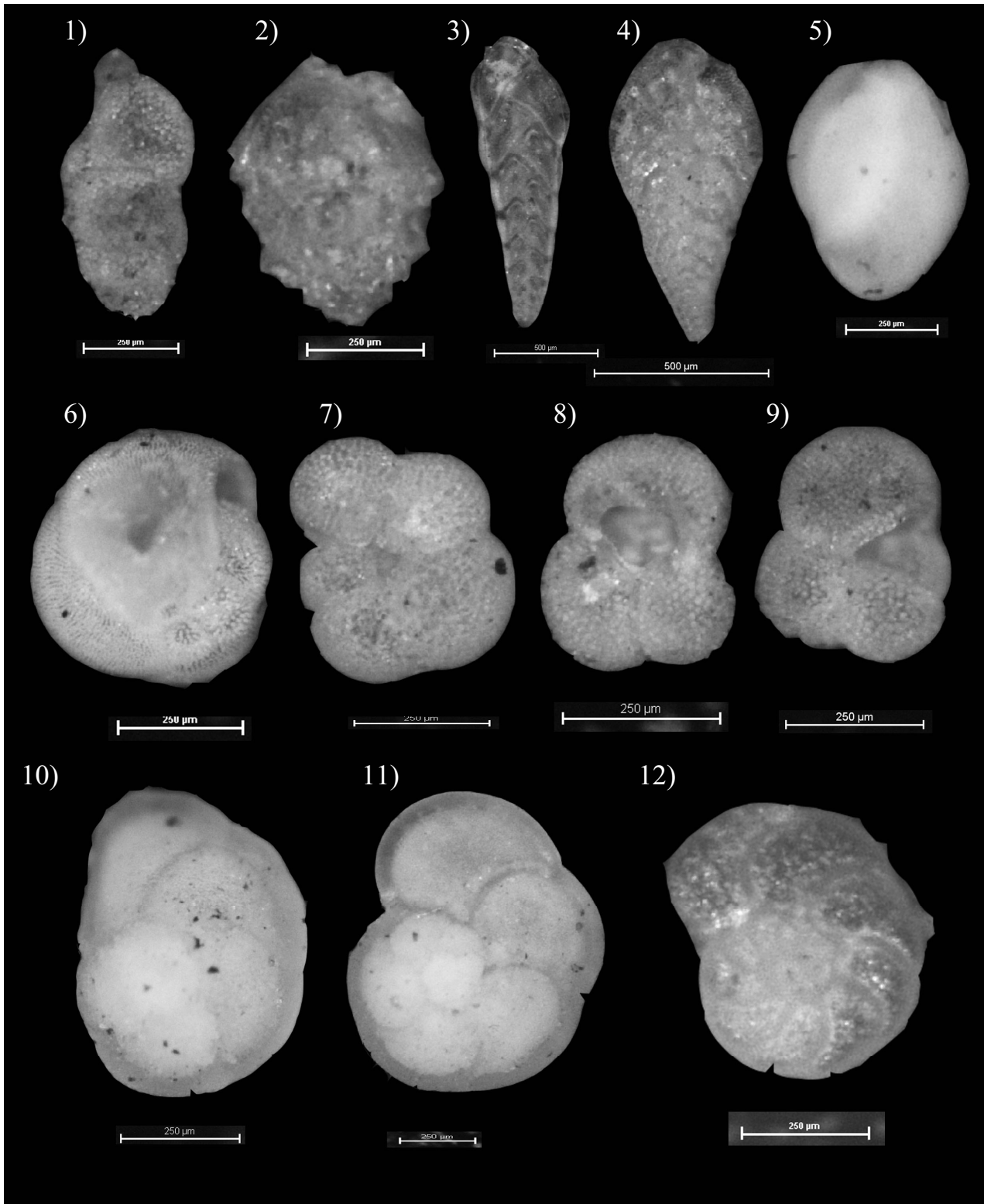
serta *Globorotalia menardii* (Gambar 2). Jenis planktonik lainnya yang hadir tidak terlalu berlimpah namun cukup signifikan adalah *Orbulina universa*, *Sphaeroidinella* spp., *Globorotalia crassaformis* dan *Candeina nitida*. Jenis foraminifera benthik yang mendominasi dan sering hadir adalah *Bulimina* spp., *Bolivinita quadrilatera*, *Bolivina* spp., dan *Uvigerina* spp. (Gambar 2), serta beberapa jenis yang agak berlimpah antara lain *Martinottiella communis*, *Heterolepa*, *Eggerella*, *Gyroidina*, *Quinqueloculina*, dan *Hoglundina elegans*.

Untuk mengetahui umur sedimen, dilakukan pemodelan umur berdasarkan korelasi data oksigen isotop di daerah penelitian dengan data oksigen isotop di Laut Timor dan dikombinasikan dengan hasil dating ^{14}C (Tabel 1). Berdasarkan korelasi tersebut maka disimpulkan sedimen bor MD10-3339 sampai kedalaman 30 m telah diendapkan sejak sekitar 50.000 tahun BP (posisi 0 tahun adalah tahun 1950), dengan kecepatan sedimentasi 0,05 cm/tahun.

Berdasarkan hasil analisis oksigen isotop diperoleh nilai $\delta^{18}\text{O}$ *G. ruber* bervariasi dari -1,15‰ sampai -2,92‰, dengan nilai rata-rata -1,8‰. Pola fluktuasi nilai oksigen isotop mengidentifikasi perubahan periode glasiasi di Laut Halmahera. Glasial akhir terjadi sampai kedalaman sekitar 1.110 cm (sekitar 20.000 tahun lalu), dicirikan oleh nilai oksigen isotop relatif lebih berat yang biasanya mencirikan suhu dingin dan/atau salinitas tinggi. Nilai isotop yang dianggap sangat berat mencerminkan peristiwa glasial akhir maksimum (LGM, *Last Glacial Maximum*). Selanjutnya nilai $\delta^{18}\text{O}$ *G. ruber* relatif berkurang secara cepat, menandakan terjadinya kenaikan suhu tiba-tiba akibat mencairnya es dan menandakan berakhirnya saat glasial. Periode ini disebut masa transisi (deglasiasi) sebelum memasuki iklim hangat

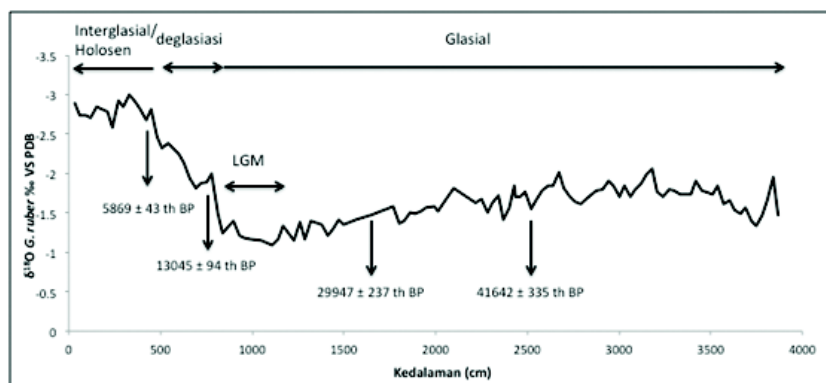
Tabel 1. AMS ^{14}C dating dan kalibrasi umur dari bor sedimen MD3339

Kedalaman (cm)	Material	Laboratorium	Referensi	Umur Radiokarbon (tahun)	Umur Kalender (cal year BP)
390	Foram planktonik campuran	Artemis	SacA 25960	5560 \pm 35	5869.5 \pm 43
690	Foram planktonik campuran	Artemis	SacA 25099	11650 \pm 60	13045 \pm 94
1650	Foram planktonik campuran	Artemis	SacA 25961	25690 \pm 140	29947 \pm 237
2550	Foram planktonik campuran	Artemis	SacA 25100	37290 \pm 450	41642 \pm 335



Gambar 2. Foraminifera planktonic dan bentik yang mendominasi di MD3339. 1) *Uvigerina peregrina*, 2) *Bulimina striata*, 3) *Bolivinita quadrilateral*, 4) *Bolivina robusta*, 5) *Quinqueloculina* sp., 6) *Pulleniatina obliqueloculata*, 7) *Neogloboquadrina dutertrei*, 8) *Globigerinoides ruber*, 9) *Globigerina bulloides*, 10) *Globorotalia tumida*, 11) *Globorotalia menardii*, 12) *Planulina wuellerstorfi*.

(interglasial disebut juga Holosen). Perubahan suhu yang tiba-tiba ini terus berlangsung sampai kedalaman 510cm, dan selanjutnya $\delta^{18}\text{O}$ *G. ruber* tidak lagi memperlihatkan penurunan yang drastis menandakan telah memasuki kala Holosen yang cenderung beriklim hangat sampai sekarang (Gambar 3).



Gambar 3. Nilai oksigen isotop cangkang foraminifera *G. ruber* yang menunjukkan peristiwa perubahan glasiasi, yaitu glasial akhir, LGM, deglasiasi dan interglasial (Holosen). Nomor dengan tanda panah menunjukkan umur berdasarkan analisis dating¹⁴C dari cangkang foraminifera planktonik.

PEMBAHASAN

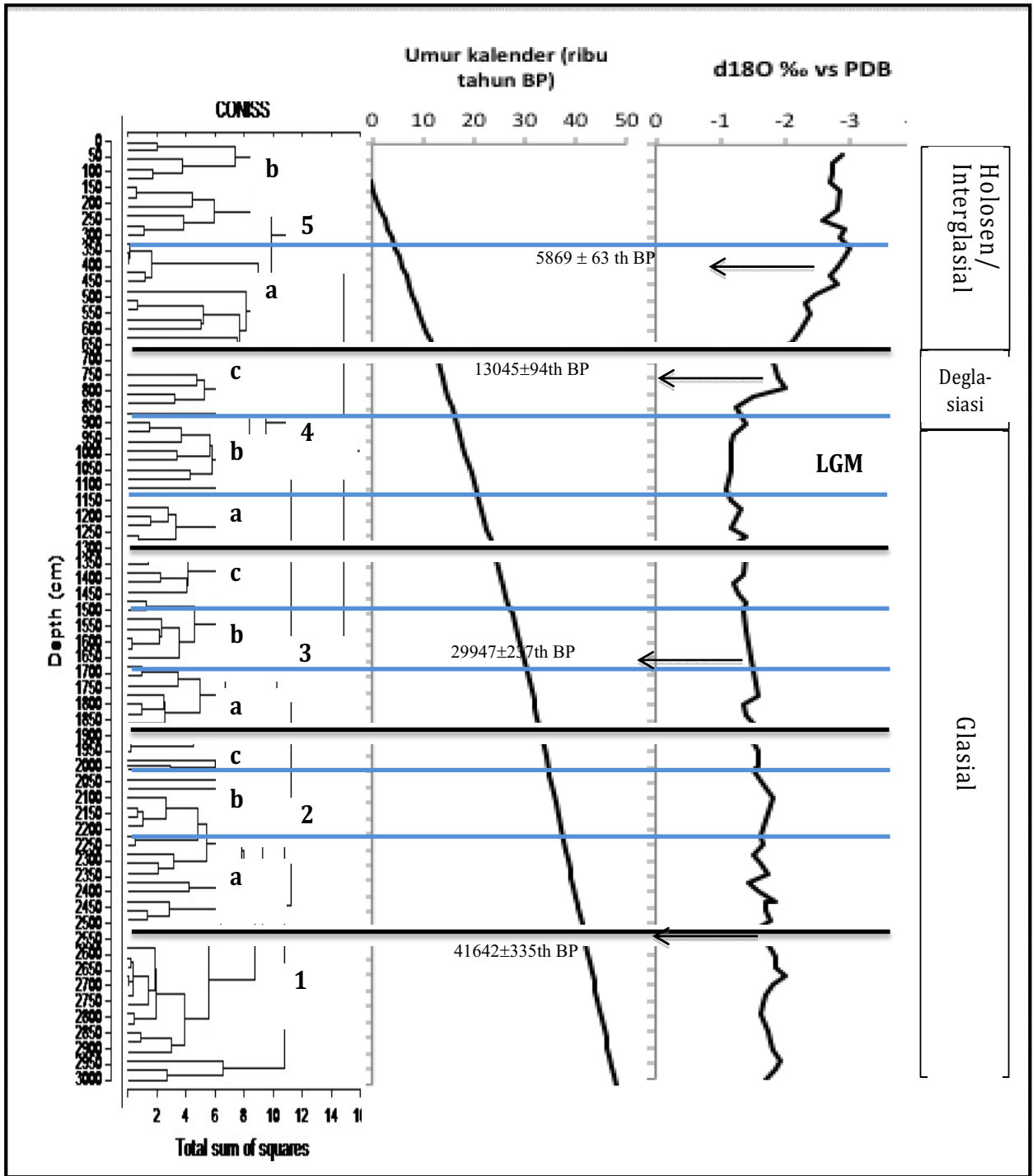
Jenis foraminifera benthik yang dominan di bor sedimen MD3339 (*Bulimina* spp., *Bolivinita quadrilatera*, *Bolivina* spp., dan *Uvigerina* spp.) menunjukkan bahwa secara umum Laut Halmahera sejak 50000 tahun lalu merupakan batial atas – bawah, yang juga didukung oleh tingginya persentase foraminifera planktonik (>90%).

Berdasarkan kelimpahan foraminifera tersebut kemudian dilakukan pembagian biozonasi dengan menggunakan analisis *cluster hierarchical single linkage* dengan program R. Distribusi foraminifera dan beberapa jenis yang memiliki lingkungan ekologi sama digabungkan, seperti grup *Bulimina-Bolivina-Uvigerina*, grup *Cibicides* (termasuk *Planulina wuellerstorfi*, *Heterolepa* spp.), grup *Quinqueloculina-Spiroloculina-Triloculina*, dan grup *Textularia* spp.

Biozonasi foraminifera berdasarkan karakteristik jenis yang dominan dapat mencerminkan kondisi perubahan lingkungan dan mengindikasikan pengaruh kuat dari perubahan glasial – interglasial. Hal tersebut terlihat jelas ketika dendrogram foraminifera dikorelasikan

dengan data oksigen isotop (Gambar 4). Beberapa periode perubahan iklim jelas teridentifikasi antara lain Periode glasial (zona 1 sampai subzona 4b), kondisi LGM (subzona 4b), deglasiasi (subzona 4c) dan periode interglasial/Holosen (zona 5). Adapun karakteristik masing-masing peristiwa adalah sebagai berikut (dari tua ke muda) (Gambar 5):

- Zona 1 (3000 – 2550cm) dicirikan oleh kelimpahan foraminifera rata-rata sekitar 300 spesimen/gr. Jenis yang dominan adalah *Bulimina* spp., *Bolivina* spp., *Uvigerina* spp., *Bolivinita quadrilatera*, dan *Cibicides* spp. Selain itu juga mengandung *Islandiella*, *Oridorsalis*, *Lenticulina*, dan *Pullenia*. Kelimpahan tertinggi adalah pada kedalaman 3000 cm, yaitu mencapai 1370 spesimen/gr. Jenis-jenis *Bolivina*, *Bulimina*, dan *Uvigerina* merupakan penciri lingkungan dengan kandungan oksigen minimum (*disoxic*), sementara *Bolivinita quadrilatera* dan *Martinottiella communis*, *Heterolepa*, serta *Gyroidina* merupakan jenis yang hidup pada tingkat oksigen menengah (*suboxic*) (Kaiho,1991, dalam Aksu., dr., 2002), sehingga zona ini cenderung memiliki kandungan oksigen rendah – menengah. Berlimpahnya grup *Cibicides* spp. Terutama *Planulina wuellerstorfi* mencirikan kondisi arus kuat, karena *Cibicides* merupakan salah satu genus yang dipengaruhi oleh arus dalam berkecepatan tinggi (Murray, 1991). Rendahnya kelimpahan *G. ruber* terutama pada kedalaman 2850cm bisa diinterpretasikan menunjukkan kondisi dingin. Spesies ini hidup di dekat permukaan laut dan mencerminkan temperatur pada musim panas atau hangat (Pflaumann dan Jian, 1999; Xu, dr., 2008). Spesies-spesies penciri termoklin terdiri dari *N. dutertrei*, *G. menardii* dan *P. obliqueloculata*, memiliki kelimpahan cenderung tinggi menunjukkan termoklin yang mendangkal (Wang, dr., 2003; Spooner, dr., 2005; Sijinkumar, dr., 2011).
- Zona 2 (interval 2550 – 1920cm), kelimpahan foraminifera dan kondisi lingkungan masih sama dengan sebelumnya, kecuali pada kedalaman 2434cm foraminifera meningkat



Gambar 4. Korelasi dendrogram analisis cluster kelimpahan foraminifera dengan grafik oksigen isotop dan model umur. Garis hitam adalah batas zona, garis biru adalah batas subzona.

tajam yaitu mencapai 7908 spesimen/gr. Zona ini kemudian dibagi menjadi 3 subzona, yaitu:

- Subzona 2a (2550 – 2250cm) didominasi oleh *Bulimina*, *Bolivina*, *Uvigerina*, *Cibicides*, *Bolivinita*, dan *Hoglundina*, serta grup Miliolina. Komposisi foraminifera ini menunjukkan lingkungan batial atas dengan kandungan oksigen meningkat dibandingkan zona sebelumnya berdasarkan kelimpahan *Bolivinita* yang tinggi. Kecepatan arus laut dalam relatif kuat karena *Planulina wuellerstorfi* berlimpah. *G. ruber* mempunyai kelimpahan yang tinggi pada kedalaman 2550cm dan 2400cm, namun pada kedalaman 2460cm persentasenya rendah. Hal ini menunjukkan adanya fluktuasi suhu. Pada kedalaman 2434cm, kelimpahan foraminifera menjadi sangat tinggi (7908 spesimen/gr) yang didominasi oleh *Oridorsalis*, *Cibicides*, dan *Textularia*.
- Subzona 2b (2250 – 2040 cm), dicirikan oleh berkurangnya kelimpahan *Bulimina*, *Bolivina*, *Uvigerina*, *Cibicides* dan meningkatnya grup Miliolina yang mencirikan peningkatan salinitas dibandingkan zona di bawahnya (Murray, 2006). Lingkungan batial atas, dengan masih hadirnya *Bolivinita*, *Cassidulina*, dan *Heterolepa*, serta kondisi oksigen menengah. Kecuali pada interval 2190cm, menunjukkan agak tingginya kelimpahan *Bulimina*, *Bolivina*, dan *Uvigerina*, sementara grup Miliolina rendah. Selain itu pada kedalaman 2100cm, lingkungan menjadi lebih dalam mungkin mencapai batial bawah dengan hadirnya *Laticarinina pauperata* (Grimsdale dan van Morkhoven (1955, dalam Maryunani, 2009).
- Subzona 2c (2040 – 1920cm), kelimpahan foraminifera masih tidak berubah, kelimpahan Miliolina berkurang, menjadi seimbang dengan *Bulimina*, *Bolivina*, *Uvigerina*, *Cibicides*, dan *Cassidulina*, mencirikan salinitas menurun. Kelimpahan *G. ruber* meningkat, sebaliknya kelimpahan spesies penciri termoklin *N. dutertrei* dan *P. obliqueloculata* cenderung menurun. Hal ini mencirikan suhu hangat, termoklin mendalam, kandungan oksigen menengah, dan arus laut dalam melemah.
- Zona 3 (1920 – 1290cm), masih didominasi *Bulimina*, *Bolivina*, *Uvigerina*, dan hadir pula *Cibicides*, *Pullenia*, Miliolina, dan *Bolivinita*. Zona ini dibagi 3 subzona, yaitu:
 - Subzona 3a (1920 – 1680cm), dicirikan oleh *Pullenia*, *Bolivina*, *Cibicides*, *Quinqueloculina* dan *Bolivinita*, yang relatif hadir secara konsisten di seluruh biozona. Hal tersebut mencirikan lingkungan batial atas yang *suboxic*, suhu dingin, salinitas rendah, dan tingkat arus agak kuat.
 - Subzona 3b (1680 – 1500cm), didominasi oleh *Bolivina*, *Uvigerina*, *Cassidulina*, *Quinqueloculina*, *Bolivinita*, dan *Cibicides*. Pada kedalaman 1650cm, *G. ruber* lebih tinggi, mencirikan kondisi iklim lebih hangat dari interval lain pada zona 3. Secara umum subzona 3b merupakan batial atas, suhu dingin, tingkat oksigen rendah, salinitas tinggi hingga menengah, dan tingkat arus melemah.
 - Subzona 3c (1500 – 1290cm), kelimpahan grup disoxic (*Bulimina*, *Bolivina*, dan *Uvigerina*) menurun, bahkan *Bulimina* absen. Hal tersebut mencirikan ventilasi udara membaik. Pada kedalaman 1380cm, muncul *Laticarinina pauperata*, menandakan lingkungan batial bawah dan tingkat arus masih melemah seperti subzona 3b.
- Zona 4 (1290 – 690cm), dicirikan oleh *Cibicides*, *Bulimina*, dan *Bolivinita*, hadir pula *Islandiella*, *Quinqueloculina*, *Pullenia*, dan *Lenticulina*, serta berlimpahnya jenis planktonik *N. dutertrei*. Zona 4 ini dibagi 3 subzona, yaitu:
 - Subzona 4a (1290 – 1140cm), didominasi oleh *Bolivinita* dan menurunnya jenis-jenis *Cibicides*, *Bulimina*, *Bolivina* dan *Uvigerina*. Komposisi ini menunjukkan kondisi *suboxic* dengan arus lemah. Demikian juga kelimpahan *Islandiella* dan Miliolina juga menurun menunjukkan kondisi salinitas menurun. Sementara itu, pada kedalaman 1170cm, terjadi kelimpahan minimum *P. obliqueloculata*, namun bersamaan dengan berlimpahnya spesies penciri termoklin antara lain spesies *N. dutertrei*. Sementara itu selain merupakan spesies penciri termoklin, *N. dutertrei* juga merupakan penciri zona *upwelling* tropis (Pflaumann dan Jian,

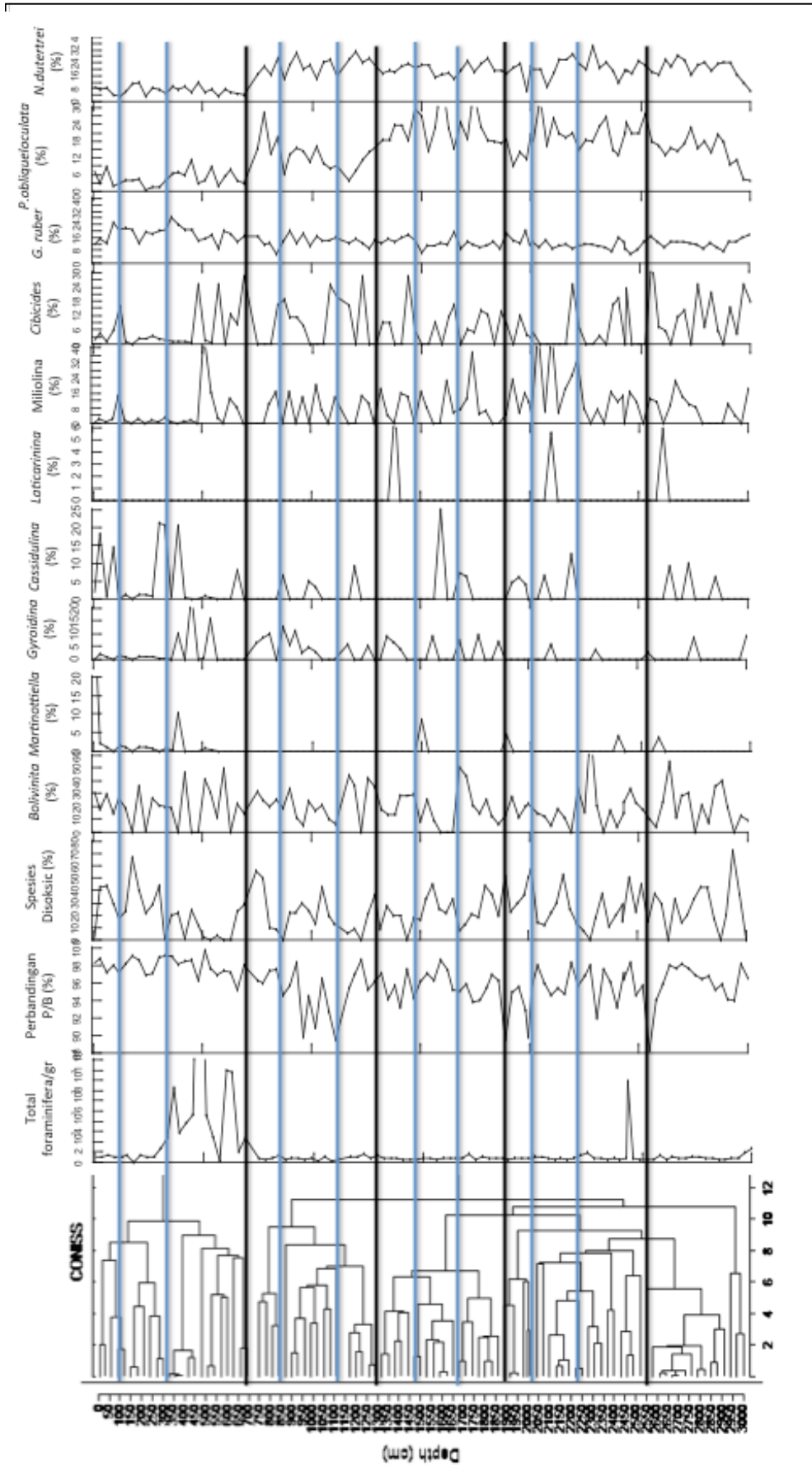
1999). Oleh sebab itu peristiwa menurunnya kelimpahan *P. obliqueloculata* kemungkinan tidak berkaitan dengan perubahan kedalaman termoklin, namun lebih disebabkan oleh menguatnya monsun timur. Hal ini mengakibatkan temperatur musim dingin yang sangat rendah dan meningkatnya *upwelling* seperti yang terekam dalam bor sedimen dari Laut Cina Selatan pada kala Holosen (Pflaumann dan Jian, 1999).

- Subzona 4b (1140 – 870cm), bersamaan dengan peristiwa LGM dicirikan oleh perbandingan P/B yang menurun. Kondisi ini menunjukkan penurunan muka laut yang mencapai sekitar 125 m dibandingkan muka laut pada kala Holosen (Fairbanks, 1989). Zona ini dicirikan oleh *Bulimina*, *Bolivinita*, *Pullenia*, dan sedikit *Gyroidina* menunjukkan lingkungan *suboxic*. *Cibicides* hadir tidak konsisten dan kelimpahan minimum dijumpai pada kedalaman 1050 – 990cm. Kondisi ini menunjukkan saat paling dingin dan mengakibatkan kekuatan arus laut dalam sangat lemah.
- Subzona 4c (870 – 690cm), merupakan periode deglasiasi yang didominasi oleh *Bulimina*. Hal tersebut menunjukkan kandungan oksigen yang menurun, walaupun *Pullenia* dan *Lenticulina* masih hadir. Kelimpahan *G. ruber* masih minimum yang didukung oleh meningkatnya *P. obliqueloculata* dan *N. dutertrei*. Kondisi ini menunjukkan temperatur masih dingin dan mendangkalnya kedalaman termoklin dan/atau meningkatnya *upwelling*. Namun demikian perbandingan P/B dan grup *Miliolina* semakin menurun yang menunjukkan adanya kenaikan muka laut dan penurunan salinitas berkaitan dengan mencairnya es di kutub serta meningkatnya presipitasi. Batimetri masih batial atas, intensitas arus sangat rendah ditunjukkan oleh rendahnya kelimpahan *Cibicides* terutama *Planulina wuellerstorfi*.
- Zona 5 (690 cm – 4cm). Zona ini diawali oleh kelimpahan minimum dari *N. dutertrei* dan *P. obliqueloculata* pada kedalaman 660 cm. Kejadian ini juga terjadi di Laut Andaman (Sijinkumar, dr. 2011) dan di Palung Okinawa di Laut Cina Timur (Li, dr. 1997) yang

kemungkinan berkaitan dengan melemahnya monsun barat dan menyebabkan suhu menjadi lebih dingin serta termoklin mendalam. Kejadian ini bertepatan dengan kejadian *Younger Dryas* (YD) di bumi bagian utara pada sekitar 13000 tahun yang lalu menyebabkan kondisi iklim menjadi dingin dan kering (Sijinkumar, dr. 2011), atau bertepatan dengan peristiwa *Antarctic Cold Reversal* (ACR) di bumi bagian selatan (EPICA Community members, 2006). Peristiwa ini juga dicirikan oleh nilai perbandingan P/B yang menurun dibandingkan zona 4. Selanjutnya terjadi kenaikan kelimpahan foraminifera secara drastis yaitu mencapai 2397 spesimen/gr berat kering. Kondisi ini juga diiringi dengan meningkatnya perbandingan P/B. Peristiwa ini bertepatan dengan semakin menghangatnya iklim dan berkaitan dengan dimulainya periode interglasial (Holosen). Iklim yang menghangat ini dicirikan oleh semakin berlimpahnya *G. ruber* menunjukkan produktivitas meningkat. Sementara itu, kelimpahan spesies penciri *suboxic* dan *oxic* semakin berkurang, serta kelimpahan *Miliolina* menjadi sangat rendah, menunjukkan berkurangnya salinitas. Hal tersebut berkaitan dengan semakin meluasnya es yang mencair di kutub dan meningkatnya tingkat presipitasi. Kelimpahan *Cibicides* semakin menurun yang menunjukkan kekuatan arus lebih lemah bila dibandingkan pada glasial.

Zona 5 ini terbagi menjadi 3 subzona, yaitu:

- Subzona 5a (690 – 300cm) dicirikan oleh sangat berlimpahnya foraminifera, terutama pada kedalaman 690cm (2349 spesimen/gr) dan semakin meningkat pada kedalaman 600cm (8886 spesimen/gr). Kelimpahan foraminifera menurun seketika pada kedalaman 570cm namun kembali meningkat dan bahkan mencapai puncak kelimpahan pada kedalaman 480cm (21229 spesimen/gr). Periode kelimpahan foraminifera yang sangat meningkat ini kemungkinan berkaitan dengan peristiwa Mid Holosen Maksimum yang dicirikan oleh iklim hangat dengan produktivitas maksimum. Kondisi suhu hangat dicirikan oleh tingginya kelimpahan *G. ruber*. Sebaliknya kelimpahan *Bulimina*, *Bolivina* dan *Uvigerina* berkurang bahkan hampir tidak ada terutama pada kedalaman 570 – 510cm. Kelimpahan *Bolivinita* dan *Gyroidina* tinggi mencirikan membaiknya



Gambar 5. Korelasi antara dendrogram kelimpahan foraminifera dikorelasikan dengan kelimpahan total foraminifera, nilai P/B ratio, serta kelimpahan spesies tertentu yang dapat mencerminkan kondisi oseanografi pada setiap perubahan iklim.

sirkulasi oksigen menjadi *suboxic*. *Cibicides* masih hadir sampai kedalaman 450cm, namun sejak kedalaman 480cm kelimpahannya berkurang dengan cepat, menunjukkan kekuatan arus semakin lemah.

- Subzona 5b (300 – 90cm), dicirikan oleh kelimpahan foraminifera yang menurun kembali terutama jenis foraminifera bentik, kecuali *Bulimina*, *Bolivina*, dan *Uvigerina* yang meningkat dengan kelimpahan maksimum pada kedalaman 180cm. Hal tersebut menunjukkan kandungan oksigen minimum.
- Subzona 5c (90 – 4cm). Pada subzona ini, kelimpahan foraminifera tidak berubah dari subzona sebelumnya. *Bulimina* masih dominan menunjukkan rendah oksigen. Kelimpahan *Cassidulina* dan *Martinotiella* meningkat dan mencapai kelimpahan maksimum pada kedalaman 4cm. *Cibicides* dan *G. ruber* memperlihatkan pola kelimpahan yang semakin berkurang hingga sekarang, menunjukkan penurunan suhu dan intensitas arus dasar laut. Sementara itu *P. obliqueloculata* dan *N. dutertrei* kelimpahannya meningkat kemungkinan terjadi pendangkalan kedalaman lapisan termoklin.

Hasil analisis kelimpahan mikrofauna tersebut memperlihatkan suatu pola kelimpahan spesies *N. dutertrei* yang cenderung lebih tinggi pada glasial. Pola ini ternyata merupakan suatu pola yang terjadi secara regional di Perairan Indonesia, terutama pada *Marine Isotope Stage 2* dan *3*, misalnya di Laut Sulu pada MIS 3 dan 2 (Linsley, dr., 1985), di Laut Maluku pada 27000 tahun yang lalu (Barmawidjaja, dr., 1993) dan di Laut Banda pada 48000 – 15000 tahun BP (Spooner, dr., 2005). Kejadian ini berkaitan dengan meningkatnya produktivitas pada lapisan DCM (*Deep Chlorophyll Maximum*), yaitu suatu lapisan yang berkembang apabila termoklin berada pada kedalaman dengan penetrasi cahaya yang baik (Barmawidjaja, dr., 1993 dan Spooner, dr., 2005). Hal tersebut menunjukkan bahwa pada glasial ini terjadi pendangkalan lapisan termoklin yang diperlihatkan dengan berlimpahnya spesies penciri termoklin (*N. dutertrei*, *P. obliqueloculata*, dan *G. menardii*) dan kondisi temperatur lebih dingin dibandingkan kala Holosen.

KESIMPULAN

Dari uraian zonasi foraminifera tersebut di atas, terlihat bahwa kelimpahan foraminifera kecil dipengaruhi oleh perubahan iklim global. Pengelompokkan biozonasi foraminifera menunjukkan korelasi yang sangat baik dengan data $\delta^{18}\text{O}$ dan mencerminkan perubahan – perubahan iklim di masa lalu sebagai berikut:

1. Periode glasial, dari zona 1 – 4b yang dicirikan oleh temperatur rendah, lapisan termoklin lebih dangkal, tingkat oksigen lebih rendah serta intensitas arus lebih tinggi. Pada glasial ini juga produktivitas pada lapisan DCM meningkat.
2. LGM (*Last Glacial Maximum*) pada subzona 4b yang dicirikan oleh perbandingan P/B lebih rendah, kekuatan arus sangat lemah.
3. Deglasiasi (subzona 4c) dicirikan oleh perubahan suhu yang semakin meningkat dan salinitas yang semakin menurun.
4. Kondisi seperti *Younger Dryas* (YD)/ACR pada awal zona 5 yang dicirikan oleh kelimpahan minimum dari *N. dutertrei* dan *P. obliqueloculata*, menunjukkan termoklin mendalam, berkaitan dengan melemahnya monsun barat dan suhu mendingin kembali.
5. Interglasial, dimulai sejak pertengahan zona 5, dicirikan oleh suhu lebih hangat, lapisan termoklin lebih dalam, tingkat oksigen meningkat dibandingkan glasial, dan salinitas rendah serta intensitas arus lebih lemah.
6. Mid Holosen Maksimum (pertengahan subzona 5a), dicirikan oleh tingkat produktivitas yang sangat tinggi ditunjukkan oleh tingginya kelimpahan foraminifera, kondisi suhu hangat dan sirkulasi oksigen baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim penelitian MONOCIR 2, LSCE dan CEA saclay, Perancis beserta staf laboratorium. Terima kasih juga diungkapkan kepada jajaran dosen dan staf ITB terutama Dr. Tjipto Raharjo dan Paryadi, serta rekan-rekan mahasiswa (Resti dan Maria). Selain itu, Penulis juga sangat berterima kasih kepada rekan-rekan di Puslitbang Geologi Kelautan (Erni Herawaty, Yani Permanawati, Nazar Nurdin, dan Diah Eko), atas bantuan dan dukungannya hingga terwujudnya karya tulis ini.

DAFTAR ACUAN

- Aksu, A., E., Hiscott, R. N., Kaminski, M. A., Mudie, P. J., Gillespie, H., Abrajano, T., dan Yasar, D., 2002. Last glacial-Holocene paleoceanography of the Black Sea and Marmara Sea: Stable isotopic, foraminiferal and coccolith evidence. *Marine Geology*, 190: 119 – 149.
- Barmawidjaja, B. M., Rohling, E. J., van der Kaars, W. A., Vergnaud Grazzini, C., dan Zachariasse, W. J., 1993. Glacial conditions in the northern Molucca Sea region (Indonesia). *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 101: 147-167.
- Bolli, H. M., Saunders, J. B., dan Perch – Nielsen, K., 1985. *Plankton stratigraphy, Vol I*. Cambridge University Press, Cambridge. 328 h.
- Bolliet, T., Holbourn, A., Kuhnt, W., Laj, C., Kissel, C., Beaufort, L., Kienast, M., Andersen, N., dan Garbe-Schönberg, D., 2011. Mindanao Dome variability over the last 160 kyr: Episodic glacial cooling of the West Pacific Warm Pool, *Paleoceanography*, 26: 18h.
- Ding, X., Bassinot, F., Guichard, F., and Fang, N. Q., 2013. Indonesian Throughflow and monsoon activity records in the Timor Sea since the Last Glacial Maximum. *Marine Micropaleontology*, 101: 115–126.
- Drinia, H., Antonarakou, A., dan Dermitzakis, M., 2003. Planktonic foraminiferal ecozones: Response of the pelagic environment to palaeoclimatic changes in the eastern Mediterranean Sea. *Mediterranean Marine Science*, 4 (2): 21-38.
- EPICA Community members, 2006. One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. *Nature*, 444: 195 – 198.
- Fairbanks, R. G., 1989. A 17,000 year glacio-eustatic level record: Influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature*, 342: 637 - 642.
- Gordon, A. L., 2005. Oceanography of the Indonesian Seas and their throughflow. *Oceanography*, 18 (4): 14 – 27.
- Holbourn, A., Andrew S. Henderson, and Macleod, N., 2013. *Atlas of Benthic Foraminifera*, Wiley- Blackwell, 654h.
- Li, B., Jian, Z., dan Wang, P., 1997. *Pulleniatina obliquiloculata* as a paleoceanographic indicator in the southern Okinawa Trough during the last 20,000 years. *Marine Micropaleontology*, 32: 59–69.
- Linsley, B.K., Thunell, R.C., Morgan, C. and Williams, D.F., 1985. Oxygen minimum expansion in the Sulu Sea, Western Equatorial Pacific, during the last glacial low stand of sea level. *Mar. Micropaleontol.*, 9: 395-418.
- Loeblich, J. R., A. R. dan Tappan, H., 1994. *Foraminifera of the Sahul Shelf and Timor Sea. Cushman Foundation Special publication no.31*. Cushman Foundation for Foraminiferal Research. Cambridge, U.S.A. 661 h.
- Maryunani, K.A., 2009. Microfossil approached based on Cendrawasih Bay data, to interpreting and reconstructing equatorial western Pasific paleoclimate since Last Glacial (Late Pleistocene). *Dissertation*. Program studi Geologi. Fakultas Ilmu Kebumihan. Institut Teknologi Bandung. 141 h, tidak dipublikasikan.
- Mohtadi, M., Oppo, D.W., Steinke, S., Stuut, J.B.W., De Pol-Holz, R., Hebbeln, D., and Lückge, A., 2011. Glacial to Holocene swings of the Australian–Indonesian monsoon. *Nature Geoscience*, 4: 540 – 544.
- Murgese, D. S. dan de Decker, P., 2007. The Late Quaternary evolution of water masses in the eastern Indian Ocean between Australia and Indonesia, based on benthic foraminifera faunal and carbon isotopes analyses. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 247: 382–401.
- Murray, J. W., 1991. *Ecology and paleoecology of benthic foraminifera*. John Willey & Sons Inc., New York. 397 h.
- Murray, J. W., 2006. *Ecology and applications of benthic foraminifera*. University press.,Cambridge. 426 h.
- Pflaumann, U., dan Jian, Z., 1999. Modern distribution patterns of planktonic foraminifera in the South China Sea and Western Pacific: A new transfer technique to estimate regional sea-surface temperatures. *Marine Geology*, 156 : 41–83.
- Sijinkumar, A. V., Nagender Nath, B., Possnert, G., dan Aldahan, A., 2011. *Pulleniatina*

- minimum events in the Andaman Sea (the Indian Ocean): Implications for winter monsoon and thermocline changes. *Marine Micropaleontology*, 81: 88–94.
- Spooner, M. I., Barrows, T. T., De Deckker, P., dan Paterne, M., 2005. Palaeoceanography of the Banda Sea, and Late Pleistocene initiation of the Northwest Monsoon. *Global and Planetary Change*, 49: 28–46.
- Tedesco, K., Thunell, R., Astor, Y., dan Muller-Karger, F., 2007. The oxygen isotope composition of planktonic foraminifera from the Cariaco Basin, Venezuela: Seasonal and interannual variations. *Marine Micropaleontology*, 62: 180–193.
- van Marle, L. J., 1991. *Eastern Indonesian, Late Cenozoic smaller benthic foraminifera*, North-Holland Publ. 328h.
- Wang, P., Jian, Z., Zhao, Q., Li, Q., Wang, R., Liu, Z., Wu, G., Shao, L., Wang, J., Huang, B., Fang, D., Tian, J., Li, J., Li, X., Wei, G., Sun, X., Luo, Y., Su, X., Mao, S., dan Chen, M., 2003. Evolution of the South China Sea and monsoon history revealed in deep-sea records. *Chinese Science Bulletin*, 48 (23): 2549 – 2561.
- Xu, J., Kuhnt, W., Holbourn, A., Andersen, N., dan Bartoli, G., 2008. Changes in the vertical profile of the Indonesian Throughflow during Termination II: Evidence from the Timor Sea. *Marine Micropaleontology*, 66: 208–221.
- Zuraida, R., Holbourn, A., Nurnberg, D., Kuhnt, W., Durkop, A., dan Erichsen, A., 2009. Evidence for Indonesian Throughflow slowdown during Heinrich events 3–5. *Paleoceanography*, 24: 1 – 15.