

KARAKTER MASA AIR DI LAUT SULAWESI BERDASARKAN ANALISIS FORAMINIFERA KUANTITATIF

WATERMASS CHARACTERISTICS IN THE SULAWESI SEA BASED ON QUANTITATIVE FORAMINIFERA

M. Hendrizan¹, Widiyanti, C. A.², R. E. Prabowo², Munasri¹, Nazar Nurdin³

¹Pusat Penelitian Geoteknologi Lembaga Ilmu Pengetahuan Alam Indonesia, Jl. Sangkuriang, Bandung, Jawa Barat, Indonesia

²Fakultas Biologi, Universitas Jenderal Soedirman, Jl. dr. Soeparno, Purwokerto, Jawa Tengah, Indonesia

³Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan, Jl. Dr. Djunjunan, Bandung, Jawa Barat, Indonesia

Diterima : 13-09-2018, Disetujui : 05-03-2019

ABSTRAK

Kumpulan foraminifera dari sedimen Sumur STA 3 (0.8897°N, 119.0865°E, kedalaman laut 1294 m) di Laut Sulawesi diteliti untuk memahami ciri lingkungan purba pada lokasi sumur. Situasi modern menunjukkan Laut Sulawesi menjadi jalur Arus Lintas Indonesia (Arlindo) yang mentransport masa air dari Samudra Pasifik hingga Samudra Hindia. Studi ini difokuskan pada indeks ekologi untuk membuat struktur komunitas foraminifera dan mengevaluasi dinamika komunitas foraminifera yang terekam di inti Sumur STA 3. Metode yang digunakan dalam studi ini adalah observasi naturalistik meliputi preparasi sampel, kumpulan foraminifera (penjentikan dan identifikasi), dan analisis data. Analisis data kumpulan foraminifera menggunakan *Paleontological Statistics* (PAST) dari kelimpahan, keanekaragaman spesies Shannon-Winner (H'), indeks dominan (D), dan indeks pemerataan Pileou (J'). Analisis kluster dilakukan untuk menentukan kelompok sampel dikelompokkan berdasarkan kesamaan kumpulan foraminifera. Identifikasi foraminifera pada inti sedimen STA 3 terdiri dari 44 spesies foraminifera plankton dan 100 spesies foraminifera benthik. Indeks ekologi dari kumpulan foraminifera memperlihatkan keanekaragaman spesies berkisar antara 2.57 hingga 3.07, kisaran nilai dominan antara 0.07 hingga 0.13, dan indeks pemerataan berkisar antara 0.72 hingga 0.8. Analisis kluster memperoleh 3 kelompok lingkungan berdasarkan komposisi spesies mengindikasikan perubahan lingkungan yang tidak signifikan di sepanjang inti sedimen. Kumpulan foraminifera pada inti sedimen STA 3 mencerminkan karakteristik masa air hangat, kondisi oksigen rendah, dan asupan organik tinggi.

Kata Kunci: Foraminifera, Struktur komunitas, analisis statistik, massa air, Laut Sulawesi.

ABSTRACT

*Foraminifera assemblages of marine sediment core STA 3 (0.8897°N, 119.0865°E, depth of 294 m) in Sulawesi Sea was investigated to understand paleoenvironment feature in this core site. Modern situation shows that Sulawesi Sea provides a pathway for Indonesian Throughflow (ITF) which transports watermasses from Pacific to Indian Ocean. This study focused on the ecological indices to establish community structure of foraminifera and to evaluate community dynamic as recorded in core STA 3. Method used in this study was naturalistic observation consisting of sample preparation, foraminiferal assemblage (picking and identification), and data analysis. Data analysis of foraminifera assemblages was applied using *Paleontological Statistics* (PAST) of relative abundance, species diversity of Shannon-Wiener (H'), dominance indices (D), and Pileou evenness indices (J'). Cluster analysis was performed to determine how samples group based on the similarity of foraminiferal assemblages. Foraminifera identification in core STA 3 contains 44 species of planktonic foraminifera and 100 species of benthic foraminifera. Ecological indices of foraminiferal assemblages show species diversity of foraminiferal assemblages with a range value between 2.57 and 3.07, range of dominance values from 0.07 to 0.13, and evenness values fluctuate from 0.72 to 0.8. Cluster analysis reveals 3 clusters environment based on species composition which indicate no significant environmental changes in the entire core record. Foraminiferal assemblages in core STA 3 reflect watermass characteristics with warm water column, low bottom-water oxygenation, and high organic influx conditions.*

Keywords: Foraminifera, community structure, statistical analysis, watermass, Sulawesi Sea.

PENDAHULUAN

Dinamika air laut menjadi kajian lingkungan purba masih terus digiatkan hingga saat ini. Sirkulasi permukaan air laut di perairan Indonesia mengalami perubahan sesuai dengan pola perubahan angin muson. Selama muson timur, arus permukaan di Indonesia bergerak dengan arah utama dari timur ke barat dan hal sebaliknya terjadi pada muson barat (Wyrski, 1961). Laut Sulawesi dicirikan oleh periode *upwelling* selama muson timur dan *downwelling* selama muson barat. Selama muson barat, angin dari timur laut membawa uap air yang basah sehingga intensitas hujan meningkat membentuk lapisan penghalang (*barrier*) di Laut Sulawesi yang menghalangi air kaya nutrisi untuk bergerak ke atas (Chu, *et al.*, 2002). Selain itu, Laut Sulawesi menjadi pintu masuk dari Arus lintas Indonesia (Arlindo) yang membawa Massa air dari Samudra Pasifik menuju Samudra Hindia melalui Selat Makassar (Gordon, 2005). Oleh karena itu, karakter massa air laut di Laut Sulawesi dipengaruhi oleh karakter massa air di permukaan maupun bawah permukaan.

Studi paleoekologi berdasarkan karakteristik sedimen palung Laut Sulawesi menunjukkan pengaruh intensitas hujan yang disebabkan oleh angin muson terhadap proses pengendapan sedimen. Intensitas hujan yang meningkat pada muson barat tercermin pada sedimen berwarna gelap dan hal sebaliknya terjadi selama intensitas hujan yang menurun. Selain itu, diketahui pula bahwa selama muson timur, pasokan air bersalinitas rendah dari Laut Cina Selatan terhambat yang diiringi dengan curah hujan yang rendah menyebabkan salinitas yang tinggi di Laut Sulawesi (Hendrihan, *et al.*, 2016). Namun, karakter massa air laut yang berada dalam kolom air sendiri masih belum terkaji dalam studi sebelumnya. Sehingga studi mengenai kelimpahan foraminifera secara kuantitatif baik itu foraminifera plankton maupun bentos menjadi kerangka awal untuk memahami masa air laut di Laut Sulawesi.

Penentuan kondisi paleoekologi Laut Sulawesi pada penelitian ini menggunakan indikator biologis berupa kumpulan foraminifera. Foraminifera yang ditemukan melimpah dalam sedimen laut dikenal sebagai bioindikator ideal karena siklus hidup yang pendek, sensitivitasnya terhadap perubahan lingkungan, dan cangkangnya yang dapat terawetkan dengan baik di dalam sedimen (Hallock, *et al.*, 2003). Kumpulan foraminifera yang membentuk suatu komunitas mencerminkan hubungan antara foraminifera dengan faktor-faktor ekologis dan kemampuan

beradaptasinya (Suhartati, 1988). Komunitas foraminifera yang ditemukan dalam lapisan sedimen berperan sebagai alat rekam jejak kondisi lingkungan maupun perubahan lingkungan dalam suatu periode waktu tertentu. Oleh karena itu, informasi mengenai struktur komunitas foraminifera penting untuk diketahui mengingat perannya sebagai indikator perubahan kondisi lingkungan (Okvariani, 2002). Penelitian ini bertujuan mengetahui ciri komunitas foraminifera dan dinamika yang terjadi di dalamnya serta mengetahui kondisi lingkungan pada saat sedimen diendapkan.

Lokasi & Metode Penelitian

Laut Sulawesi dibatasi oleh Pulau Sulawesi di bagian selatan, Pulau Mindanao di bagian timur laut, Pulau Sulu di bagian barat laut dan Pulau Kalimantan di bagian barat. Cekungan Laut Sulawesi dipisahkan dari cekungan Laut Filipina di bagian timur laut oleh beberapa batas lempeng kompleks, di antaranya lempeng Sangahe, lempeng Halmahera dan pulau-pulau di wilayah nusantara Filipina. Meskipun begitu, rekonstruksi lempeng untuk periode Paleogen mengindikasikan bahwa kedua lubuk laut tersebut awalnya saling terhubung (Hall, 1996). Memasuki kala Eosen, Laut Sulawesi dan Laut Filipina mulai terpisah sebelum akhirnya menjadi wilayah yang terpisah pada Akhir Oligosen melalui proses pergerakan lempeng konvergen (Nichols & Hall, 1999).

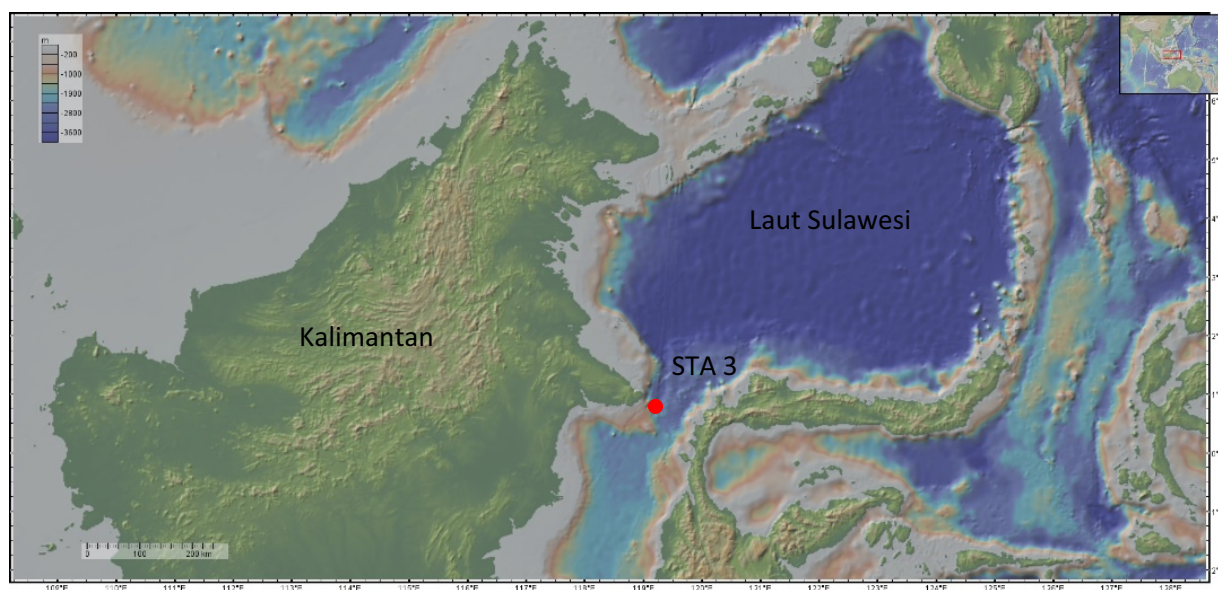
Sampel sedimen STA 3 (0.8897°N, 119.0865°E, kedalaman laut 1294 m) dengan panjang 2,74 m dengan deskripsi sedimen berupa lempung yang dikoleksi selama ekspedisi Widya Nusantara di Laut Sulawesi (Gambar 1) dicuplik (*subsampling*) dengan interval 10 cm sebelum dilakukan preparasi menggunakan hidrogen peroksida (H₂O₂) dan air. Sampel selanjutnya disaring menggunakan mesh bertingkat dengan ukuran 0,25 mm, 0,149 mm, dan 0,074 mm. Pengeringan sampel dilakukan pada suhu 60°C selama 24 jam menggunakan oven.

Proses penjentikan (*picking*) dilakukan menggunakan mikroskop pada setiap sampel. Foraminifera diletakkan di preparat foraminifera sebelum dilakukan tahap identifikasi. Identifikasi dilakukan dengan mengamati morfologi cangkang yang mencakup bentuk cangkang, jumlah kamar, apertur, dan komposisi penyusun cangkang. Selanjutnya, spesimen dibandingkan dengan yang ada di dalam pustaka untuk validasi nama spesies. Pustaka yang digunakan adalah Holbourn, *et al.*

(2013), Postuma, (1971), Barker (1960), dan Adisaputra dkk. (2010).

Indeks-indeks ekologis berupa indeks keanekaragaman (H'), indeks dominansi (D), dan indeks keseragaman (E) dihitung untuk mengetahui struktur komunitas foraminifera dari setiap sampel. Analisis multivariate yaitu analisis *cluster* dilakukan untuk mengetahui pengelompokan obyek berdasarkan atas similaritas dalam komposisi spesies foraminifera. Analisis kualitatif dan analisis multivariate tersebut dilakukan dengan menggunakan aplikasi PAST (*Paleontological Statistics*) dan Primer 6.

sebaliknya terjadi pada komposisi foraminifera bentonik, di mana terdapat variasi komposisi spesies yang cukup besar tapi individu tiap spesies yang diperoleh berjumlah sedikit. Genera foraminifera planktonik dominan adalah *Pulleniatina* dengan kelimpahan relatif 16%-36%; *Globigerinoides* dengan kelimpahan relatif 15%-28%; *Neogloboquadrina* dengan kelimpahan relatif 12,4%-31,7%; *Hastigerina* dengan kelimpahan relatif 6,4%-16,3% dan *Globorotalia* dengan kelimpahan relatif 2,6%-16,7%. Genera foraminifera bentonik dominan adalah *Cassidulina* dengan kelimpahan relatif 0,3%-5,7%; *Uvigerina*



Gambar 1. Lokasi pengambilan sampel STA 3 (0.8897°N, 119.0865°E, kedalaman laut 1294 m) di Laut Sulawesi, peta diambil menggunakan aplikasi geomappapp

HASIL PENELITIAN

Hasil pengamatan terhadap 26 sampel sedimen tersebut diperoleh 44 spesies foraminifera planktonik dan 100 spesies foraminifera bentonik. Genus planktonik yang mendominasi adalah *Pulleniatina*, sedangkan kumpulan bentonik didominasi oleh genus *Cassidulina*. Kehadiran spesies foraminifera baik planktonik maupun bentonik yang diperoleh dari tiap kedalaman cukup bervariasi. Kumpulan foraminifera yang diperoleh menunjukkan dominasi foraminifera gampingan. Cangkang aglutinan dan pasir hanya ditemukan masing-masing sebanyak 13 spesies dan 1 spesies.

Data Foraminifera

Variasi komposisi spesies foraminifera planktonik pada setiap kedalamannya tidak begitu besar (Tabel 1, Gambar 2). Namun, jumlah individu tiap spesies yang diperoleh relatif banyak. Hal

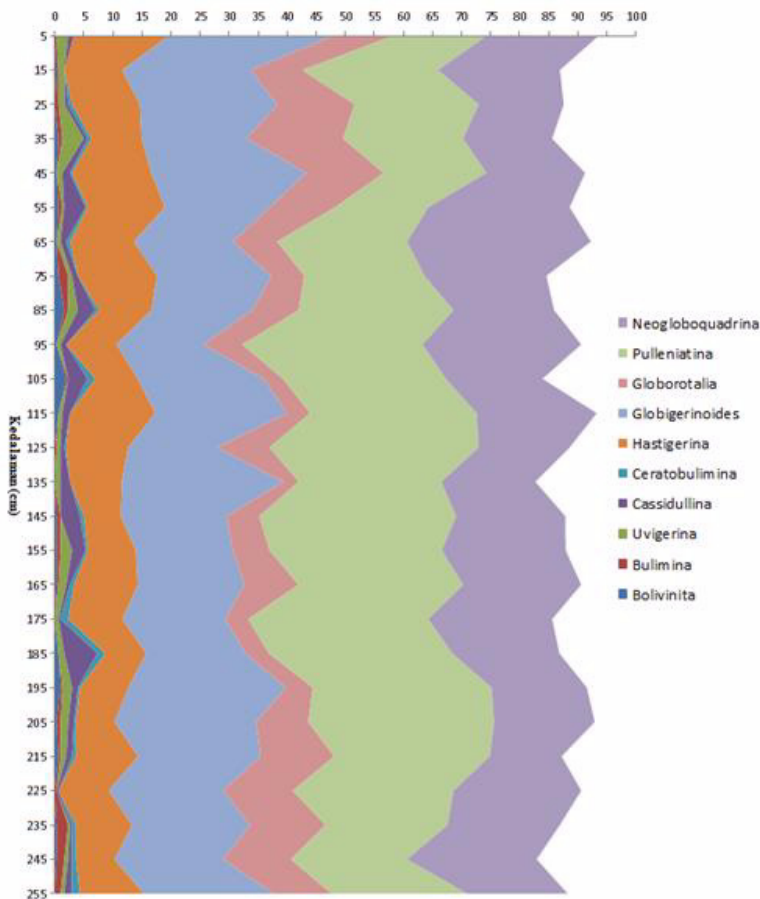
dengan kelimpahan relatif 0,3%-3,7%; *Bolivinita* dan *Bulimina* sebesar 0,3%-1,7% dan *Ceratobulimina* sebesar 0,3%-1,3% (Tabel 1 dan Gambar 3).

Genera foraminifera yang dominan (Gambar 2) di lokasi penelitian terdiri dari spesies foraminifera planktonik yang dominan pada inti sedimen STA 3 dijumpai *P. obliquiloculata*, *N. dutertrei*, *G. trilobus*, *Globorotalia menardii*, *P. praecursor*, *P. primalis*, *G. sacculifer*, *G. ruber*, dan *H. aequilateralis* dengan kelimpahan yang tinggi pada distribusi vertikal dalam sedimen yang merata di sepanjang inti sedimen. Foraminifera bentonik pada sumur STA 3 meliputi Kehadiran spesies-spesies dari kelompok uvigerinid, bolivinid, buliminid seperti *U. peregrina*, *U. proboscidea*, *Neouvigerina porrecta*, *Bolivina robusta*, *B. striata*, *B. pupoides*, *B. costata*, *B. gibba*, *B. pyrula*, *B. alazanensis*, *B. aculeata*,

Tabel 1. Kelimpahan relatif genera dominan

Kedalaman sedimen (cm)	Kelimpahan relatif									
	<i>Hasti</i>	<i>Globi</i>	<i>Globo</i>	<i>Pulle</i>	<i>Neo</i>	<i>Boliv</i>	<i>Buli</i>	<i>Uvi</i>	<i>Cassi</i>	<i>Cerato</i>
5	16,3	28,3	10,3	16,0	19,3	0,0	0,3	2,0	1,0	0,0
15	10,0	22,0	9,0	23,3	21,0	0,3	0,3	1,0	0,0	0,0
25	11,7	23,7	13,3	21,3	14,7	0,0	0,7	1,0	0,7	0,7
35	8,7	18,0	16,7	20,7	15,3	0,7	0,7	3,7	0,7	0,7
45	13,7	26,7	13,3	17,7	17,0	0,3	0,0	1,0	1,3	0,3
55	13,3	18,0	11,3	16,0	24,3	0,7	0,7	0,3	3,7	0,3
65	11,0	17,0	7,7	22,3	31,7	0,3	0,0	0,7	1,0	0,7
75	13,7	19,7	5,7	20,7	21,0	0,7	1,7	0,7	1,0	0,0
85	9,0	17,3	8,0	26,7	17,3	1,7	0,7	1,7	3,0	0,7
95	8,7	15,0	6,7	31,0	27,3	0,3	0,0	0,7	1,0	0,0
105	7,3	21,7	3,3	28,0	16,7	2,0	0,3	0,0	3,3	1,3
115	14,7	22,7	4,0	28,7	20,7	0,7	0,0	0,7	1,3	0,0
125	10,7	15,3	9,0	36,0	15,7	0,0	0,3	0,7	0,7	0,3
135	8,9	27,8	2,6	24,5	16,2	0,0	0,0	1,0	1,7	0,0
145	6,4	18,1	5,7	33,9	18,8	0,3	0,7	0,0	3,4	0,7
155	8,3	16,7	6,3	29,7	21,3	0,3	0,7	2,0	2,3	0,3
165	11,0	18,3	9,3	28,3	20,3	0,3	0,3	1,3	0,7	0,7
175	9,3	17,7	4,0	31,0	21,3	0,0	0,0	0,7	0,3	1,3
185	7,0	17,1	4,0	31,5	18,5	0,7	0,0	1,0	5,7	1,3
195	8,4	27,1	4,7	30,8	16,4	1,0	0,3	1,7	1,0	0,3
205	6,7	24,3	9,0	32,0	17,3	0,3	0,7	1,3	1,0	0,3
215	10,7	21,1	12,7	26,8	12,4	0,7	0,3	1,0	1,0	0,7
225	8,7	19,7	12,0	27,7	22,0	0,0	0,3	0,0	0,3	0,0
235	9,7	20,3	13,0	21,0	19,3	0,3	2,0	0,3	0,3	0,7
245	6,7	18,7	11,7	20,0	22,3	0,3	1,3	0,7	0,7	0,7
255	11,0	22,3	10,0	23,3	17,3	0,0	1,0	0,7	1,3	1,3

Keterangan : *Hasti* = *Hastigerina* *Boliv* = *Bolivinita*
Globi = *Globigerinoides* *Buli* = *Bulimina*
Globo = *Globorotalia* *Uvi* = *Uvigerina*
Pulle = *Pulleniatina* *Cassi* = *Cassidulina*
Neo = *Negloboquadrina* *Cerato* = *Ceratobulimina*



Gambar 2. Grafik kelimpahan relatif genera dominan foraminifera

Globobulimina pacifica, *C. subglobosa*, *Pullenia* spp. dan *Ceratobulimina pacifica*, *C. carinata*, *Martinottiella communis*, *Sphaeroidina bulloides*, *Melonis pompilioides*, *Melonis barleeaanum*, dan *Chilostomella oolina*. Kumpulan foraminifera bentonik yang terkandung dalam inti sedimen STA 3 berdasarkan ketersebarannya di dalam sedimen menunjukkan foraminifera epifaunal berjumlah 40 spesies dan foraminifera infaunal sebanyak 60 spesies. Kelimpahan relatif foraminifera epifaunal di setiap kedalaman berkisar 12,5%-48%, sedangkan foraminifera infaunal berkisar 52%-87,5% (Gambar 3).

Pengelompokkan Kumpulan Foraminifera Berdasarkan Analisis Cluster

Berdasarkan observasi dari analisis cluster terhadap kedalaman pada inti sedimen STA 3 dihasilkan 3 kelompok, yaitu Cluster I, Cluster II, dan Cluster III, (Gambar 4).

Cluster I

Kelompok ini hanya terdiri atas satu kedalaman, yaitu pada sampel 1 (kedalaman 5 cm). Kelimpahan tertinggi ditunjukkan oleh *N. dutertrei* dan *P. obliquiloculata* dengan nilai kelimpahan

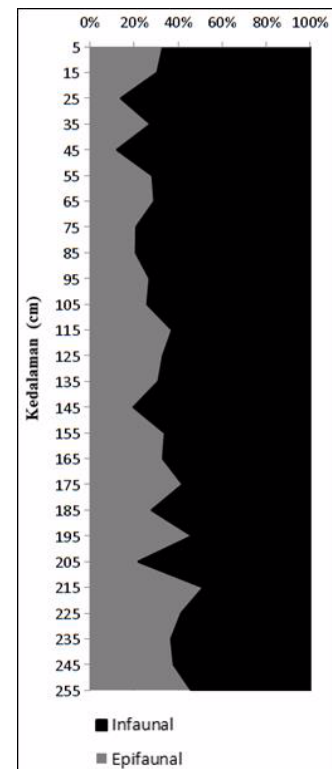
masing-masing sebesar 15% dan 13%. Kehadiran kedua spesies tersebut menunjukkan kondisi perairan hangat dan produktivitas primer yang tinggi (Be, 1977; Be & Hutson, 1977; Be & Tolderlund, 1971).

Cluster II

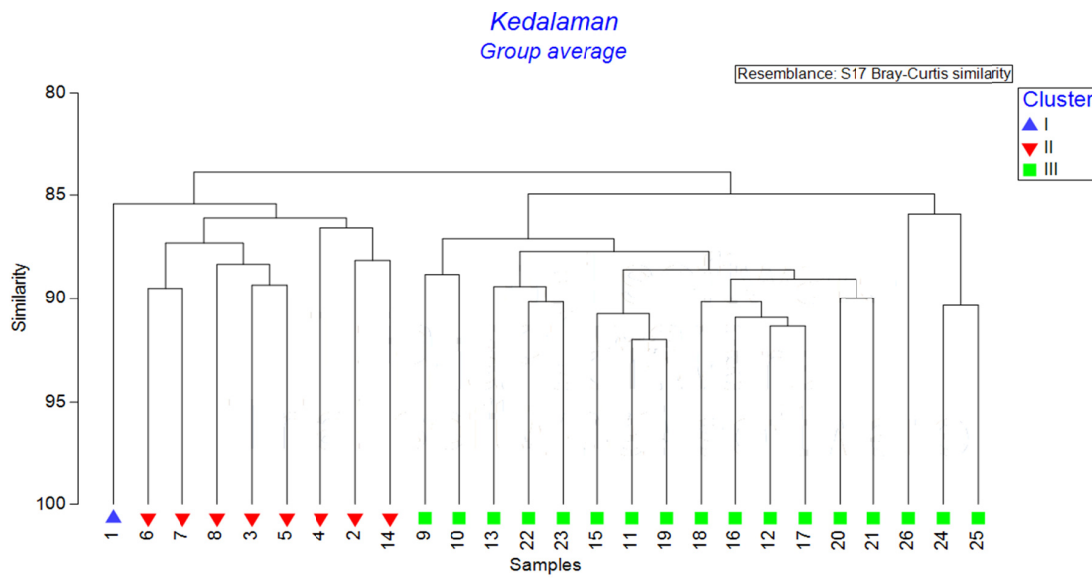
Cluster II terdiri atas kedalaman sedimen 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, dan 14. Persentase similaritas yang dihasilkan sebesar 86,7% dengan *N. dutertrei* dan *P. obliquiloculata* sebagai penyumbang similaritas terbesar. Hasil tersebut sama dengan kondisi lingkungan di Cluster I menunjukkan kondisi perairan hangat dengan produktivitas primer yang tinggi. Kelimpahan relatif *N. dutertrei* dan *P. obliquiloculata* pada Cluster II lebih tinggi dari Cluster I, dengan nilai rata-rata sebesar 16% dan 15,2%.

Cluster III

Kelompok ini terdiri atas kedalaman sedimen 9, 10, 11, 12, 13, 15 sampai kedalaman 26 dengan persentase similaritas sebesar 87,2%.



Gambar 3. Grafik taksa bentonik epifaunal dan infaunal berdasarkan kelimpahan relatif



Gambar 4. Hasil analisis cluster berdasarkan kumpulan foraminifera pada sumur STA3

Spesies dengan kontribusi similaritas terbesar adalah *P. obliquiloculata* dan *N. dutertrei*. Kehadiran kedua spesies tersebut, seperti pada Cluster I dan II, menunjukkan produktivitas primer perairan yang tinggi dan kondisi perairan yang hangat. Kelimpahan relatif *P. obliquiloculata* dan *N. dutertrei* pada Cluster III lebih tinggi dari Cluster I dan II, yaitu sebesar 21% dan 16%.

Persentase disimilaritas yang dihasilkan berkisar antara 14,6%-16,1% (Tabel 2), di mana perbedaan antar cluster hanya terletak pada kelimpahan spesies-spesies kontributor saja. Cluster I dan II memiliki persentase disimilaritas sebesar 14,6% dengan spesies kontributor terbesar *H. aequilateralis* dan *N. dutertrei*. Cluster I dan III dipisahkan dengan nilai disimilaritas 15,9% menunjukkan *P. obliquiloculata* dan *G. immaturus* sebagai kontributor terbesar. Cluster II dan III memiliki nilai disimilaritas 16,1% dengan *P.*

obliquiloculata dan *H. subcretacea* sebagai kontributor terbesar. Komposisi spesies foraminifera yang diamati di setiap kedalaman sedimen memperlihatkan dominansi spesies-spesies indikator kondisi lingkungan tertentu. *P. obliquiloculata*, *N. dutertrei*, *G. trilobus*, dan *H. subcretacea* merupakan indikator kondisi perairan hangat dengan produktivitas primer tinggi (Be, 1977; Be & Hutson, 1977; Be & Tolderlund, 1971; Spezzaferri, 1995).

PEMBAHASAN

Struktur Komunitas Foraminifera

Nilai indeks keanekaragaman Shannon-Wiener (H') foraminifera secara keseluruhan pada STA 3 berkisar antara 2,57-3,07 (Gambar 5). Nilai indeks keanekaragaman (H') tertinggi terdapat pada kedalaman 35 cm dan 245 cm, yakni sebesar 3,07. Nilai H' yang tinggi menunjukkan komunitas foraminifera yang paling beragam dengan kelimpahan individu yang paling merata. Sementara itu, nilai terendah terdapat pada kedalaman 205 cm yaitu 2,57. Konsistensi nilai H' terlihat pada kedalaman awal sedimen (5 cm-25 cm) dengan kisaran antara 2,92-2,93. Namun, nilai H' mengalami penurunan antara 65 cm hingga kedalaman 235 cm. Pada kedalaman selanjutnya, nilai H' mengalami peningkatan hingga mencapai nilai 3 pada kedalaman 235 cm-255 cm.

Tabel 2. Matriks persentase disimilaritas cluster I-III

Cluster \ Cluster	I	II	III
I		14,6	15,9
II	14,6		16,1
III	15,9	16,1	

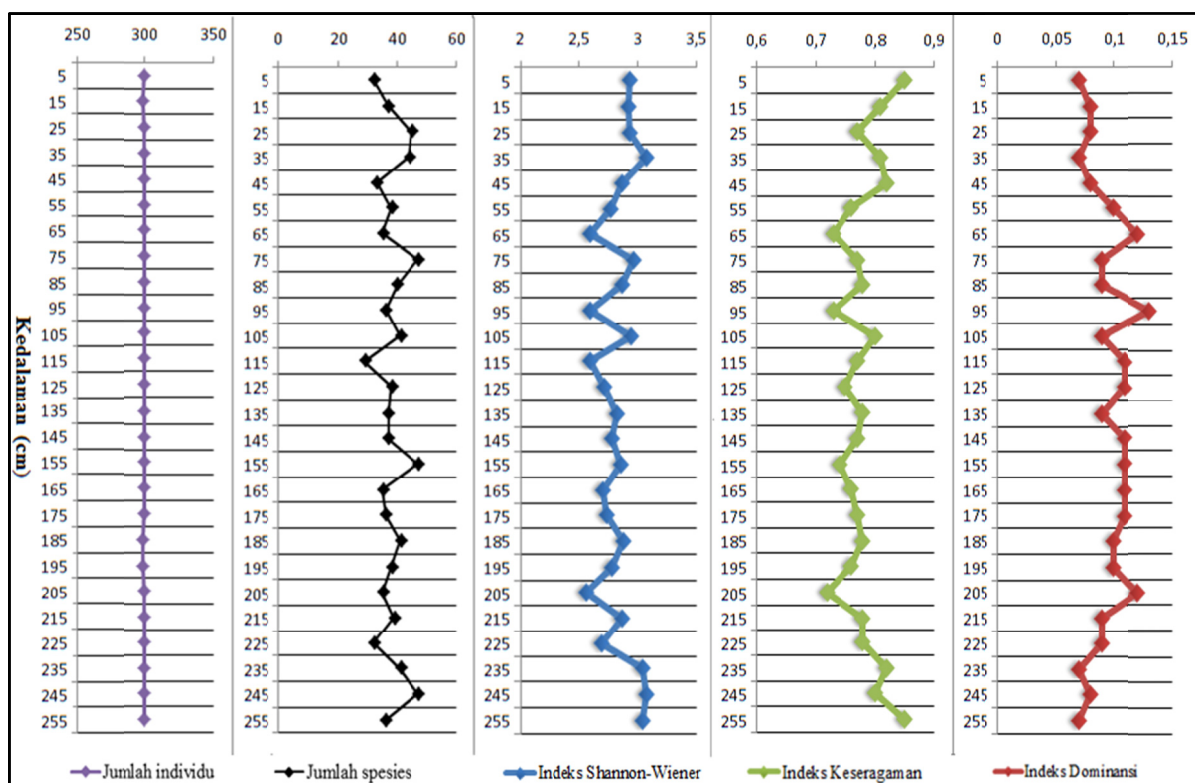
Nilai H' berkorespon dengan nilai indeks dominansi (D) dan nilai keseragaman (J') foraminifera, di mana nilai H' yang tinggi diiringi dengan nilai D yang rendah dan nilai J' yang tinggi. Nilai D yang diperoleh berkisar 0,07-0,13 dengan nilai tertinggi terdapat pada kedalaman 95 cm dengan dominasi *Neolobocarrina dutertrei*. Nilai kemerataan Pileou (J') yang diperoleh dari kelompok foraminifera berkisar antara 0,72-0,85 dengan nilai tertinggi pada kedalaman 5 cm dan 225 cm. J' memiliki pola yang berkebalikan dengan nilai D . Indeks keanekaragaman memberikan informasi lebih jauh mengenai stabilitas lingkungan. Selain itu, indeks tersebut juga menggambarkan dampak stres lingkungan terhadap suatu kelompok organisme (Boltovskoy & Wright, 1976). Nilai H' pada kumpulan foraminifera perairan dengan kondisi lingkungan normal umumnya $>2,1$ (Murray, 1991). Terganggunya kestabilan suatu lingkungan akan berdampak pada penurunan nilai indeks keanekaragaman dan spesies tertentu akan mendominasi. Jika nilai H' kurang dari 2, maka keseimbangan dalam suatu kumpulan foraminifera terganggu yang ditunjukkan oleh dominasi taksa yang toleran terhadap stres lingkungan (Di Stefano, *et al.*, 2010).

Nilai H' stabil yang diperlihatkan pada kedalaman awal (5 cm-25 cm) dan kedalaman akhir

(235 cm-255 cm) menunjukkan banyaknya spesies foraminifera dengan kelimpahan yang merata. Jumlah spesies yang banyak dalam suatu komunitas menunjukkan kondisi lingkungan yang stabil pada interval-interval tersebut. Sementara itu, nilai H' yang berfluktuasi di kedalaman lain antara 25 hingga 235 cm menunjukkan kondisi lingkungan yang kurang stabil. Kondisi lingkungan pada sumur STA3 berdasarkan komposisi spesies foraminifera menunjukkan produktivitas primer tinggi yang mendukung banyak spesies foraminifera untuk tumbuh dan berkembangbiak. Kondisi yang menguntungkan ini terjadi mengingat sumber makanan utama foraminifera, yaitu fitoplankton hadir dengan jumlah melimpah. Selain itu, kelimpahan yang tinggi dari spesies-spesies indikator produktivitas primer tinggi yang konsisten di setiap kedalamannya menunjukkan kondisi menguntungkan tersebut yang berkelanjutan.

D. Interpretasi Kondisi Lingkungan

Produktivitas primer yang tinggi ditunjukkan dengan kehadiran taksa penciri produktivitas tinggi pada inti sedimen STA 3 yaitu *P. obliquiloculata*, *N. dutertrei*, *N. eggeri*, *H. subcretacea*, *G. trilobus*, *Globigerina bulloides*, *Globorotalia tumida* dan *Globorotalia menardii*. Secara umum, kehadiran kelompok



Gambar 5. Grafik indeks ekologi foraminifera di sumur STA3

Neogloboquadrina mengindikasikan adanya lapisan klorofil maksimum (*deep chlorophyll maximum*) (Kuroyanagi & Kawahata, 2004). Taksa *P. obliquiloculata*, *P. praecursor*, *P. primalis*, *G. sacculifer*, *G. ruber*, *H. aequilateralis*, *Globorotalia menardii*, dan *N. dutertrei* ditemukan dengan kelimpahan tinggi dan distribusi vertikal dalam sedimen yang merata pada inti sedimen STA3 menunjukkan kondisi perairan yang hangat (Be, 1977; Be & Hutson, 1977; Be & Tolderlund, 1971; Jones, 1967; Spezzaferri, 1995)

Kemunculan *Globorotalia scitula*, *Globigerinita glutinata*, dan *Globigerinoides immaturus* dalam jumlah yang sedikit juga terekam dalam inti sedimen STA 3. Ketiga spesies tersebut merupakan taksa perairan dingin (Be, 1977; Spezzaferri, 1995). Konsistensi dominasi taksa perairan hangat mengindikasikan kondisi perairan yang hangat di Laut Sulawesi pada periode tersebut. Laut Sulawesi dengan kondisi permukaan air yang hangat menunjukkan tersedianya sinar matahari yang optimal untuk selanjutnya mendukung proses fotosintesis yang menghasilkan produktivitas primer. Ketersediaan cahaya merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi produktivitas primer perairan mengingat perannya sebagai komponen utama dalam proses fotosintesis. Organisme autotrof utama yang menentukan produktivitas primer perairan adalah fitoplankton (Valiela, 1984).

Kehadiran spesies-spesies dari kelompok uvigerinid, bolivinid, buliminid yang melimpah di lokasi penelitian menunjukkan kondisi oksigenasi dasar laut yang rendah (Kaiho, 1994; Gupta & Thomas, 1999; Van der Zwaan, 1982). Selain itu, kondisi perairan dengan aliran materi organik tinggi (Gupta & Thomas, 1999; Jayaraju, *et al.*, 2010; Caralp, 1989; Tyszka & Kaminski, 1995; Seiglie, 1968) ditunjukkan oleh kehadiran kelompok uvigerinid, buliminid, bolivinid seperti *C. subglobosa*, *Martinottiella communis*, *Sigmoilopsis schlumbergeri*, *Fursenkoina bradyi*, *Eggerella bradyi*, *Sphaeroidina bulloides*, *Melonis pompilioides*, dan *Ammobaculites agglutinans*.

Metabolisme dalam sedimen dasar laut digerakkan oleh input materi organik yang bergerak menuju dasar laut (Muller & Suess, 1979). Sebagian besar bahan organik tersebut disuplai dari produktivitas pada zona fotik, dan sebagian kecil berasal dari aliran turbiditas (sedimen dan bahan organik) yang mengalir dari bagian laut yang lebih dangkal atau dari transport lateral pada kedalaman menengah. Materi organik tersebut akan diendapkan dan selanjutnya diproses

oleh komunitas mikroba, protozoa, dan metazoa yang beraneka ragam dan hanya sejumlah kecil saja yang terkubur atau terawetkan sebagai total organic carbon (TOC) di dalam sedimen (Middleburg & Levin, 2009).

Ketersediaan materi organik dan oksigen merupakan parameter yang sangat penting untuk foraminifera bentik (Drinia, 2009). Keduanya saling berhubungan, di mana semakin tinggi suplai materi organik, maka semakin rendah kandungan oksigen dalam air. Bukti mengenai hubungan antara materi organik dan oksigen di daerah penelitian terlihat pada komposisi foraminifera bentonik epifaunal dan infaunal (Gambar 3) dimana foraminifera bentonik infaunal lebih mendominasi dengan kisaran 52%-87,5% dibandingkan foraminifera bentonik epifaunal yang berkisar antara 12,5%-48%. Studi di lokasi lain memperlihatkan foraminifera bentonik epifaunal tidak toleran terhadap kondisi oksigenasi rendah, namun dapat berkompetisi untuk mendapat makanan. Foraminifera bentonik epifaunal ditemukan mendominasi pada lingkungan dasar laut dengan oksigenasi yang tinggi (Van der Zwaan, 1982). Sementara itu, foraminifera infaunal menyukai lingkungan dasar laut dengan bahan organik tinggi dan oksigenasi yang rendah. Dominasi taksa infaunal dalam suatu kumpulan foraminifera mengindikasikan kondisi lingkungan perairan dengan produktivitas yang tinggi (Jorissen, *et al.*, 1995). Dengan ciri ketersediaan materi organik tinggi dan kondisi air laut di dasar dengan kondisi oksigen rendah maka diduga lokasi penelitian dengan menunjukkan kondisi air laut yang eutrofik.

KESIMPULAN

Kumpulan foraminifera yang terkandung di dalamnya memiliki keanekaragaman yang tinggi yang ditunjukkan dengan jumlah spesies bervariasi dengan kelimpahan yang cukup merata. Kondisi paleoekologi sedimen inti di Laut Sulawesi STA 3 berdasarkan komposisi dan kelimpahan foraminifera menunjukkan kondisi perairan di kolom air dengan ciri produktivitas primer tinggi dan hangat yang dilihat dari kluster foraminifera *Neogloboquadrina dutertrei* dan *Pulleniatina obliquiloculata*. Kondisi produktivitas primer tinggi juga didukung oleh jumlah spesies foraminifera yang tinggi namun kestabilan lingkungan terganggu di sebagian besar inti sedimen STA 3 antara 25 hingga 235 cm yang diperlihatkan oleh indeks ekologi foraminifera. Sedangkan kondisi air laut di dasar

memperlihatkan kandungan oksigen rendah dengan aliran materi organik ke dasar laut yang tinggi yang dicirikan oleh dominasi taksa bentonik infaunal. Penjabaran dari bukti ekologi foraminifera yang dijumpai pada inti sedimen STA 3 menunjukkan kondisi air laut yang eutrofik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Pusat Penelitian Geoteknologi Lembaga Ilmu Pengetahuan Alam atas kesempatan yang diberikan untuk melakukan studi mikrofauna dan Pusat Penelitian Oceanografi yang telah mendanai pengambilan contoh sedimen di Laut Sulawesi. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Arief Rachman, ketua peneliti pelayaran riset Ekspedisi Widya Nusantara (EWIN 2014) Leg 2 yang telah memberikan akses sumur STA3 untuk diterbitkan dalam publikasi ini. Selain itu, penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Djoko Trisuksmo dan Amar yang telah membantu dalam preparasi sampel di laboratorium mikropaleontologi, Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI.

ACUAN

Adisaputra, M. K., Hendrizon, M. & Kholiq, A., 2010. *Katalog Foraminifera Perairan Indonesia*. Bandung: Badan Litbang Energi dan Sumberdaya Mineral.

Barker, R.W. 1960. Taxonomic notes on the species figured by H.B. Brady in his report on the foraminifera dredged by H.M.S. Challenger during the years 1873-1876: *SEPM Special Publication*, Volume 9, pp. 1-238.

Be, A. W. H., 1977. An ecological, zoogeographic and taxonomic review of recent planktonic foraminifera. Dalam: *Oceanic Micropaleontology*. London: Academic Press, pp. 1-100.

Be, A. W. H. & Hutson, W. H., 1977. Ecology of planktonic foraminifera and biogeographic patterns of life and fossil assemblages in the Indian Ocean. *Micropaleontology*, Volume 23, pp. 360-414.

Be, A. W. H. & Tolderlund, B. S., 1971. Distribution and ecology of living planktonic foraminifera in surface waters of the Atlantic and Indian Oceans. Dalam: *Micropaleontology of The Oceans*. London: Cambridge University Press, pp. 105-149.

Boltovskoy, E. and Wright, R. (1976) *Recent Foraminifera*. Junk, The Hague, 515 p.
<http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-2860-7>

Caralp, M. H., 1989. Size and morphology of the benthic foraminifer *Melonis barleeanum*; relationship with marine organic matter. *Journal of Foraminiferal Research*, 19(3), pp. 235-245.

Chu, C. P., Liu, Q., Jia, Y. & Fan C., 2002. Evidence of a barrier layer in the Sulu and Celebes Seas. *American Meteorological Society*, Volume 2, pp. 3299-3309.

Di Stefano, A. et al., 2010. Paleoenvironmental conditions preceding the Messinian Salinity Crisis in the Central Mediterranean: Integrated data from the Upper Miocene Trave section (Italy). *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleocology*, Volume 297, pp. 37-53.

Drinia, H., 2009. Palaeoenvironmental reconstruction of the Oligocene Afales Basin, Ithaki island, western Greece. *Central European Journal of Geosciences*, 1(1), pp. 1-18.

Gupta, A. K. & Thomas, E., 1999. Latest Miocene through Pleistocene Paleooceanography, Evolution of the NW Indian Ocean. *Paleooceanography*, Volume 31, pp. 111-124.

Gordon, A.L. 2005. Oceanography of the Indonesian Seas and their throughflow. *Oceanography*, vol. 18, p. 14-27.

Hall, R., 1996. Reconstructing Cenozoic Southeast Asia. *Geological Society Special Publication*, Volume 106, pp. 153-184.

Hallock, P., Lidz, B. H., Cockey-Burkhard, E. M. & Donnelly, K. B., 2003. Foraminifera as bioindicators in coral reef assessment and monitoring. *Environmental Monitoring and Assessment*, 11(1), pp. 40-46.

Hendrizon, M., Zuraida, R. & Cahyarini, S. Y., 2016. Karakteristik sedimen palung Laut Sulawesi (sumur STA12) berdasarkan hasil pengamatan megaskopis dan sifat fisika dari pengukuran *multi-sensor core logger* (MSCL). *Riset Geologi dan Pertambangan*, 26(1), pp. 69-80.

Holbourn, A., Henderson, A. S. & MacLeod, N., 2013. *Atlas of Benthic Foraminifera*. New Jersey: John Wiley and Sons.

Jayaraju, N., Reddy, B., Reddy, K. & Reddy, A. N., 2010. Deep-sea benthic foraminiferal

- distribution in southwest Indian Ocean: Implications to Paleoecology. *International Journal of Geosciences*, Volume 1, pp. 79-86.
- Jones, J. I., 1967. Significance of distribution of planktonic foraminifera in the Equatorial Atlantic Undercurrent. *Micropaleontology*, 13(4), pp. 489-501.
- Jorissen, F. J., de Stigter, H. C. & Widmark, J. G. V., 1995. A conceptual model explaining benthic foraminiferal microhabitats. *Marine Micropaleontology*, Volume 26, pp. 3-15.
- Kaiho, K., 1994. Benthic foraminiferal dissolved-oxygen index and dissolved-oxygen levels in the modern ocean. *Geology*, Volume 22, pp. 719-722.
- Middleburg, J. J. & Levin, L. A., 2009. *Coastal hypoxia and sediment biogeochemistry*. Biogeosciences, Volume 6, pp. 1273-1293
- Muller, P. J. & Suess, E., 1979. *Productivity sedimentation rate and sedimentary organic matter in the oceans*. Deep Sea Research, Volume 26, pp. 1347-1367.
- Murray, J. W., 1991. *Ecology and Palaeoecology of Benthic Foraminifera*. Harlow: Longman
- Harlow Nichols & Hall, 1999
- Okvariani, M., 2002. *Kelimpahan dan distribusi horizontal foraminifera benthik resen di perairan utara Pulau Kangean, Kabupaten Sumenep, Madura Timur*, Bandung: Universitas Padjadjaran.
- Postuma, J. A., 1971. *Manual of Planktonic Foraminifera*. London: Elsevier Science.
- Seiglie, G. A., 1968. Foraminiferal assemblages as indicators of high organic carbon content in sediments and of polluted waters. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 52(11), pp. 2231-2241.
- Spezzaferri, S., 1995. Planktonic foraminiferal paleoclimatic implications across the Oligocene-Miocene transition in the oceanic record (Atlantic, Indian and South Pacific). *Paleogeography Paleoclimatology Paleoecology*, pp. 43-74114.
- Suhartati, M. N., 1988. First note of brackish water agglutinated foraminifera from Jawa. *Tropical Biodiversity*, 3(2), pp. 57-63.
- Tyszka, J. & Kaminski, M. A., 1995. *Factors controlling the distribution of agglutinated foraminifera in Aalenian-Bajocian dysoxic facies*. Krakow, Grzybowski Foundation Special Publication.
- Valiela, I., 1984. *Marine Ecological Process*. New York: Springer.
- Van der Zwaan, G. J., 1982. Paleocology of late Miocene Mediterranean Foraminifera. *Micropaleontological Bulletin*, Volume 25, p. 202.
- Wyrтки, Klaus. 1961. Physical oceanography of Southeast Asian waters. *UC San Diego: Scripps Institution of Oceanography*.