

## ANALISIS PERUBAHAN SUHU PERMUKAAN LAUT DAN IDENTIFIKASI *UPWELLING* BERDASARKAN FORAMINIFERA PLANKTONIK SEJAK AKHIR *LAST GLACIAL MAXIMUM* DI WILAYAH PERAIRAN PULAU SIMEULUE, ACEH

WINDA EKA MANDIRI PUTERI<sup>1</sup>, KHOIRIL ANWAR MARYUNANI<sup>1</sup>, PURNA SULASTYA PUTRA<sup>1,2</sup>,  
SEPTRIONO HARI NUGROHO<sup>1,2</sup>

1. Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No.10 Bandung 40132, Email: windaeka812@gmail.com
2. Pusat Penelitian Geoteknologi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Jl. Sangkuriang Bandung 40135

**Sari** – Analisis perubahan iklim dan lautan di wilayah perairan Pulau Simeulue Aceh sejak Pleistosen Akhir hingga Resen dilakukan karena daerah ini berada di wilayah tropis Samudra Hindia yang memiliki peran dalam dinamika iklim global. Wilayah perairan barat Sumatra terletak di timur Samudra Hindia yang dipengaruhi oleh variabilitas atmosfer dan lautan sepanjang tahun. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perubahan suhu permukaan laut (SPL) dan mengidentifikasi *upwelling* dengan menggunakan proksi foraminifera. Penelitian dilakukan dengan menggunakan sampel inti sedimen EW17-08 sepanjang 217 cm yang diambil dari kedalaman 2.811 m di perairan barat Pulau Simeulue Aceh pada posisi 94° 46' 43" BT dan 2° 29' 47" LU. Berdasarkan hasil pentarikhan AMS C-14 umur inti sedimen laut dalam EW17-08 pada interval kedalaman 216-217 cm adalah 21.300 BP (Pleistosen Akhir). Berdasarkan hasil analisis SPL menggunakan metode *Modern Analogue Technique (MAT)*, rata-rata SPL pada Pleistosen Akhir adalah 27.78°C dan pada Holosen rata-rata SPL adalah 28.15°C. Berdasarkan SPL dan foraminifera kelompok tropis-subtropis terdapat 4 (empat) periode variasi iklim sejak ~21.300 BP. Perbedaan SPL pada Pleistosen Akhir-Holosen di daerah penelitian tidak terlalu signifikan namun terjadi beberapa kali penurunan SPL secara cepat yang kemungkinan berkaitan dengan peristiwa perubahan iklim di bumi yang terjadi sejak *Last Glacial Maximum (LGM)* seperti deglasiasi, *Oldest Dryas*, *Bølling Interstadial*, *Older Dryas*, *Allerød Interstadial*, *Younger Dryas*, *Preboreal-Boreal*, *8.2k event*, *Holocene Thermal Maximum*, *4.2k event*, *Subboreal*, dan *Little Ice Age*. Intensitas *upwelling* di daerah penelitian menunjukkan peningkatan pada Pleistosen Akhir yaitu pada kedalaman 100-160 cm berdasarkan kelimpahan *Globigerina bulloides* dan foraminifera lainnya. Intensitas *upwelling* diperkirakan dipengaruhi oleh peningkatan intensitas muson tenggara.

**Kata Kunci:** foraminifera, SPL, *upwelling*, perairan Pulau Simeulue Aceh, Samudra Hindia

**Abstract** – *Analysis of climate change and oceanography in Simeulue waters, Aceh since the Late Pleistocene-Holocene were researched because this study area located in the tropical Indian Ocean which plays a role in the dynamics of the global climate change. The study area is on the eastern Indian Ocean which is affected by the variability of the atmosphere and oceans throughout the year. This study aims to determine changes in sea surface temperature (SST) and to identify upwelling using foraminifera proxy. A marine sediment core EW17-08 along 217 cm (94° 46' 43" longitude and 2° 29' 47" latitude) was retrieved from the western side of Simeulue Island, Aceh, waterdepth of 2.811 m. Based on AMS radiocarbon dating, the age of sediment core EW17-08 is 21.300 BP (Late Pleistocene). Based on SST analysis using Modern Analogue Technique (MAT) method, the average SST in the Late Pleistocene and during Holocene was 27.78°C and 28.15°C, respectively. Based on SST and tropical-subtropical foraminifera, there are 4 (four) periods of climate variation since ~21,300 BP. The difference of SST in the Late Pleistocene-Holocene in the study area is not very significant, but there have been several abrupt decreased of SST which may be related to climate change events on earth that occurred since the Last Glacial Maximum (LGM) such as deglaciation, *Oldest Dryas*, *Bølling Interstadial*, *Older Dryas*, *Allerød Interstadial*, *Younger Dryas*, *Preboreal-Boreal*, *8.2k event*, *Holocene Thermal Maximum*, *4.2k event*, *Subboreal*, and *Little Ice Age*. The intensity of upwelling in the study area showed an increase in the Late Pleistocene at a depth of 100-160 cm based on abundance of *Globigerina bulloides* and the others. The upwelling intensity is estimated to be influenced by the increasing intensity of the southeast monsoon.*

**Keywords:** foraminifera, SST, *upwelling*, waters of Simeulue Island, Aceh, Indian Ocean

## 1. PENDAHULUAN

Wilayah penelitian berada di sisi timur Samudra Hindia yaitu bagian barat perairan Pulau Simeulue, Aceh. Samudra Hindia merupakan salah satu Samudra yang memiliki peran utama dalam dinamika iklim global dan cukup dinamis antara interaksi atmosfer dan lautan (Li dkk., 2016). Hal ini mempengaruhi sirkulasi atmosfer hingga ke utara Atlantik dan meluas ke sirkum Atlantik (Kuhnert dkk., 2014). Perubahan iklim di Indonesia berkaitan langsung dengan perubahan suhu permukaan laut (SPL) yang sangat sensitif sehingga dibutuhkan data yang akurat mengenai SPL di daerah penelitian baik kondisi saat ini maupun di masa lalu (Mohtadi dkk., 2010).

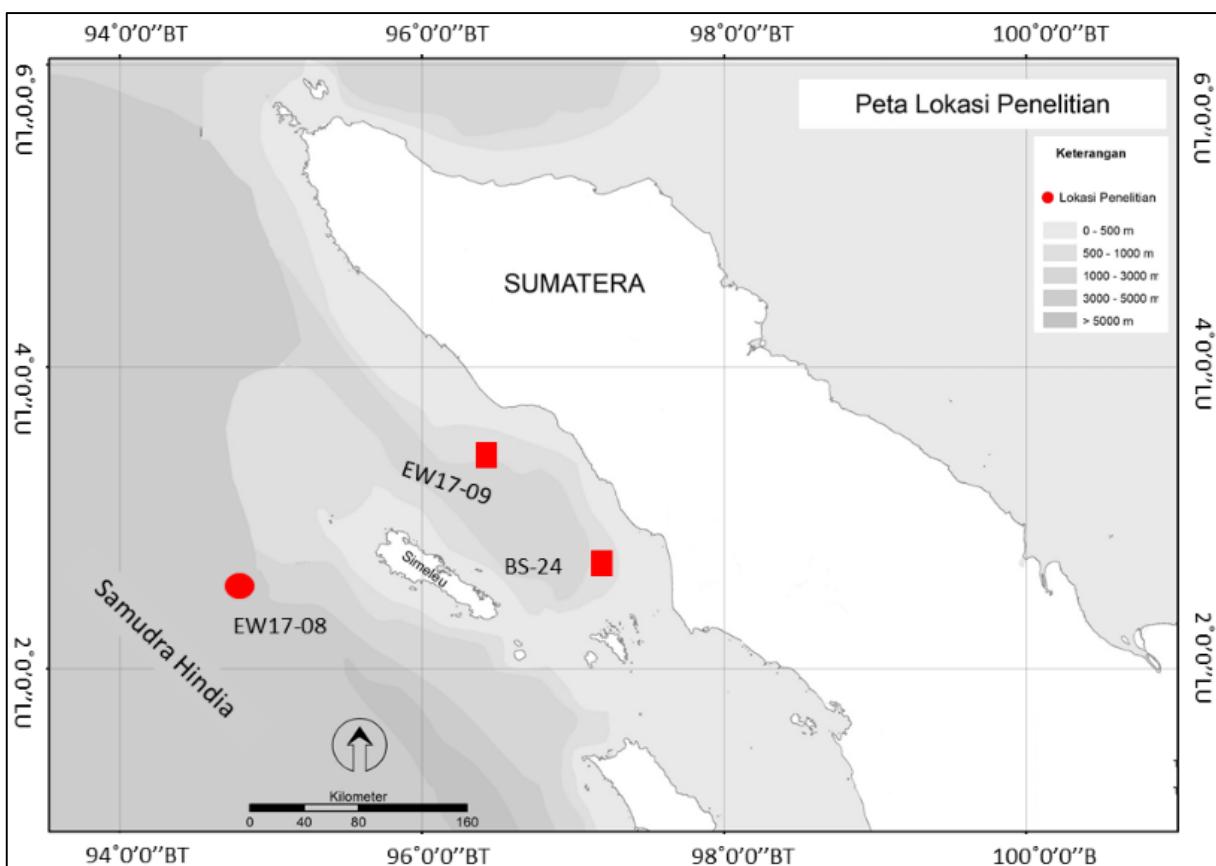
Perubahan paleoklimatologi di sekitar daerah penelitian terekam oleh berbagai macam proksi baik di darat maupun di lautan seperti koral dan foraminifera (Abram dkk., 2007; Murgese dkk., 2008; Mohtadi dkk., 2010; Cahyarini, 2013; Li dkk., 2018; Pamungkas, 2018; Habibi, 2018; Nugroho dkk., 2020; Nugroho dan Putra, 2020; Nugroho dkk., 2021). Pada penelitian ini, foraminifera digunakan sebagai proksi karena foraminifera sensitif terhadap perubahan ekologi sehingga dapat memberikan gambaran kondisi seperti perubahan SPL, salinitas, nutrisi, kadar oksigen laut dalam, dan *upwelling* (Haq dan Boersma, 1998; Bradley, 2015). Distribusi foraminifera planktonik secara vertikal dapat diakibatkan oleh perubahan sirkulasi lautan contohnya pada musim dingin beberapa spesies hidup di dekat permukaan daripada saat musim panas terjadi (Haq dan Boersma, 1998).

Pada penelitian ini perubahan SPL dan intensitas *upwelling* dianalisis berdasarkan kelimpahan foraminifera planktonik pada inti sedimen laut dalam di wilayah perairan barat Pulau Simeulue, Aceh. Kumpulan foraminifera yang terpreservasi dengan baik pada sedimen inti laut dalam dapat menggambarkan kondisi SPL dan intensitas *upwelling* di masa lalu (Murgese dkk., 2008; Maryunani, 2009; Mohtadi dkk., 2010; Ardi dkk., 2019; Damanik dkk., 2020). *Upwelling* pada perairan selatan

Pulau Jawa dan barat Pulau Sumatra merupakan respon dari angin regional yang berasosiasi dengan muson tenggara (Susanto dkk., 2001). *Upwelling* merupakan peristiwa naiknya massa air dari lapisan bawah ke permukaan perairan (Silubun dkk., 2015). *Upwelling* akan membawa nutrisi dan zat hara sehingga kesuburan perairan tersebut akan meningkat (Mustikasari dkk., 2015). Daerah penelitian yang berada di perairan barat Sumatra yang memiliki garis pantai berarah barat laut-tenggara memiliki intensitas *upwelling* yang lebih rendah dibandingkan *upwelling* di selatan Jawa yang pantainya berarah barat-timur (Susanto dkk., 2001).

Beberapa studi dan observasi telah dilakukan sebelumnya di sekitar daerah penelitian untuk merekonstruksi SPL dengan menggunakan berbagai macam metode seperti rasio Mg/Ca dan fungsi transfer berdasarkan proksi foraminifera (Murgese dkk., 2008; Mohtadi dkk., 2010; Habibi, 2018; Li dkk., 2018; Pamungkas, 2018). Penelitian terdekat sebelumnya dilakukan oleh Pamungkas (2018) dengan kode sampel EW17-08, Li dkk. (2018) dengan kode sampel BS24, dan Habibi (2018) dan Nugroho dkk. (2021) dengan kode sampel EW17-09 di sekitar Pulau Simeulue. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan sampel yang sama dengan Pamungkas (2018) yaitu EW17-08, namun menggunakan metode yang berbeda, lebih detail, dan lebih lengkap dibandingkan penelitian terdahulu (**Gambar 1**).

Penelitian ini diharapkan dapat melengkapi data SPL di wilayah bagian timur Samudra Hindia dengan menggunakan metode yang berbeda dari penelitian sebelumnya yaitu metode *Modern Analogue Technique (MAT)*. Selain itu identifikasi intensitas *upwelling* di perairan barat Pulau Simeulue juga perlu dilakukan karena terbatasnya informasi mengenai *upwelling* di sekitar daerah penelitian. terutama sejak Pleistosen Akhir hingga Resen.



**Gambar 1.** Lokasi inti sedimen beberapa peneliti terdahulu di sekitar Pulau Simeulue. EW17-08 (Pamungkas, 2018; Lokasi Penelitian ini); EW17-09 (Habibi, 2018; Nugroho dkk., 2001); BS24 (Li dkk., 2018).

## 2. DATA DAN METODE PENELITIAN

### 2.1 Data dan Geokronologi

Penelitian ini menggunakan data inti sedimen dasar laut dalam dengan kode sampel EW17-08 ( $94^{\circ} 46' 43''$  BT dan  $2^{\circ} 29' 47''$  LU) yang diambil dari barat daya Pulau Simelueu, Aceh yang merupakan bagian timur Samudra Hindia. Sampel EW17-08 berumur Kuarter didapatkan oleh Tim Peneliti LIPI melalui Ekspedisi Widya Nusantara tahun 2017 (**Gambar 1**). Inti sedimen laut dalam sepanjang 217 cm diambil dari kedalaman 2811 m di bawah permukaan laut dari atas Kapal Riset Baruna Jaya VIII.

Penentuan umur absolut menggunakan pentarikhan C-14 yang dilakukan di laboratorium Woods Hole Oceanographic Institution, Amerika Serikat. Metode yang digunakan adalah Accelerator Mass Spectrometry (AMS). Pentarikhan C-14 dilakukan pada 2 (dua) sampel inti EW 17-08 yang menunjukkan umur 21.300 BP (kedalaman 216-217 cm) dan 12.500 BP (kedalaman 136-

137 cm). Sampel interval 136-137 cm menggunakan genus *Globorotalia* sedangkan sampel interval 216-217 cm menggunakan beberapa genus berbeda karena keterbatasan kuantitas sampel (Gennari dkk., 2013; Ohkushi dkk., 2017). Setiap sampel yang akan dianalisis pentarikhan radiokarbon harus terdiri dari minimal 4 mg cangkang foraminifera yang telah dibersihkan dari residunya. Berdasarkan hasil interpolasi kedua umur tersebut, batas Pleistosen-Holosen berada pada umur 11.040 BP (kedalaman 120-121 cm).

### 2.2 Metode Penelitian

#### 2.2.1 Preparasi

Analisis foraminifera dilakukan dengan interval 4 cm sepanjang 217 cm. Setiap sampel tersebut ditimbang sebanyak 10 gram. Sampel sedimen pada penelitian ini belum terkonsolidasi dengan baik maka sampel dapat langsung dibersihkan dengan air. Metode yang digunakan adalah metode *swirling* yaitu sampel dimasukan ke dalam sebuah cawan dan

diaduk dengan air, sehingga terpisah antara lanau dengan butiran cangkang foraminiferanya. Kemudian sampel dicuci dengan air mengalir di atas saringan dengan ukuran 30-80-100 mesh. Residu yang tertinggal pada saringan 80 dan 100 mesh diambil dan dikeringkan dengan oven dengan suhu kurang lebih 60°C. Setelah proses pengeringan selesai, sampel siap untuk dianalisis kandungan foraminiferanya.

### 2.2.2 Determinasi Kuantitatif

Determinasi setiap spesies foraminifera planktonik dilakukan dengan menggunakan beberapa literatur diantaranya adalah Blow (1970) dan Bolli dkk. (1985). Metode kuantitatif digunakan pada penelitian ini. Menurut Dennison dan Hay (1967), jumlah individu foraminifera dianggap merepresentasikan kurang lebih 95% dari seluruh kemunculan foraminifera di dalam suatu sampel adalah sebanyak 300 individu foraminifera. Oleh sebab itu sebelum dideterminasi sampel dibagi menjadi beberapa bagian yang setiap bagian diperkirakan mengandung sebanyak 300 individu fosil. Kemudian satu bagian dipilih untuk dideterminasi seluruh individunya. Bagian lain yang tidak dipilih sebelumnya diperiksa untuk mencari spesies yang belum muncul pada bagian yang dianalisis. Jumlah spesies dari bagian lain tersebut dianggap berjumlah satu individu.

Langkah selanjutnya adalah normalisasi setiap sampel. Normalisasi terbagi menjadi dua yaitu, pertama normalisasi berdasarkan banyaknya pembagian (*split*) yang dilakukan terhadap sampel batuan dan kedua normalisasi berdasarkan massa dari setiap sampel batuan tersebut. Berikut merupakan rumus yang digunakan untuk normalisasi berdasarkan banyaknya pembagian pada sampel batuan.

$$N = 2^n \times A$$

Keterangan:

$n$  = jumlah split

$A$  = jumlah spesimen pada satu bagian yang dianalisis

Jika terdapat kelebihan atau kekurangan saat penimbangan sampel batuan dapat dinormalisasi dengan menggunakan rumus:

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

### 2.2.3 Pengolahan Data

Analisis perubahan suhu dilakukan dengan menganalisis perubahan yang terjadi pada kelompok-kelompok foraminifera. Pembagian zona foraminifera berdasarkan distribusi horizontal dibagi menjadi 2 yaitu kelompok tropis dan kelompok subtropis (Boltovskoy, 1976; Haq dan Boersma, 1998). Pembagian kelompok foraminifera tropis dan subtropis dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Untuk mendapatkan data SPL sejak Pleistosen hingga Resen (21.300-0 BP) di daerah penelitian, nilai SPL dihitung melalui pendekatan statistik dengan menggunakan metode *Modern Analogue Technique (MAT)* dengan bantuan perangkat lunak ANALOG yang dibuat oleh *U.S. Geological Survey* untuk mengetahui bagaimana kondisi temperatur permukaan laut (Schweitzer, 1998). Dasar analisis *MAT* adalah membandingkan kumpulan foraminifera pada sampel yang kita miliki dengan kumpulan foraminifera yang terdapat dalam database yang telah diambil dari berbagai lokasi di seluruh dunia (Maryunani, 2009). Hal ini diasumsikan bahwa data foraminifera di *database* memiliki karakteristik atau parameter yang sama dengan sampel yang dimiliki.

**Tabel 1.** Pembagian kelompok foraminifera tropis dan subtropis di Samudra Hindia (Boltovskoy, 1976; Haq dan Boersma, 1998).

Tropis	Subtropis
▪ <i>Neogloboquadrina dutertrei</i> ,	▪ <i>Globigerina bulloides</i> ,
▪ <i>Globigerinoides ruber</i> ,	▪ <i>Orbulina universa</i> ,
▪ <i>Globigernooides sacculifer</i> ,	▪ <i>Globorotalia hirsuta</i> ,
▪ <i>Pulleniatina obliquiloculata</i> ,	▪ <i>Globorotalia scitula</i> ,
▪ <i>Globorotalia menardii</i> ,	▪ <i>Hastigerina aequilateralis</i> .
▪ <i>Globigerinoides trilobus</i> ,	
▪ <i>Sphaeroidinella dehiscens</i> ,	

### 3. HASIL DAN DISKUSI

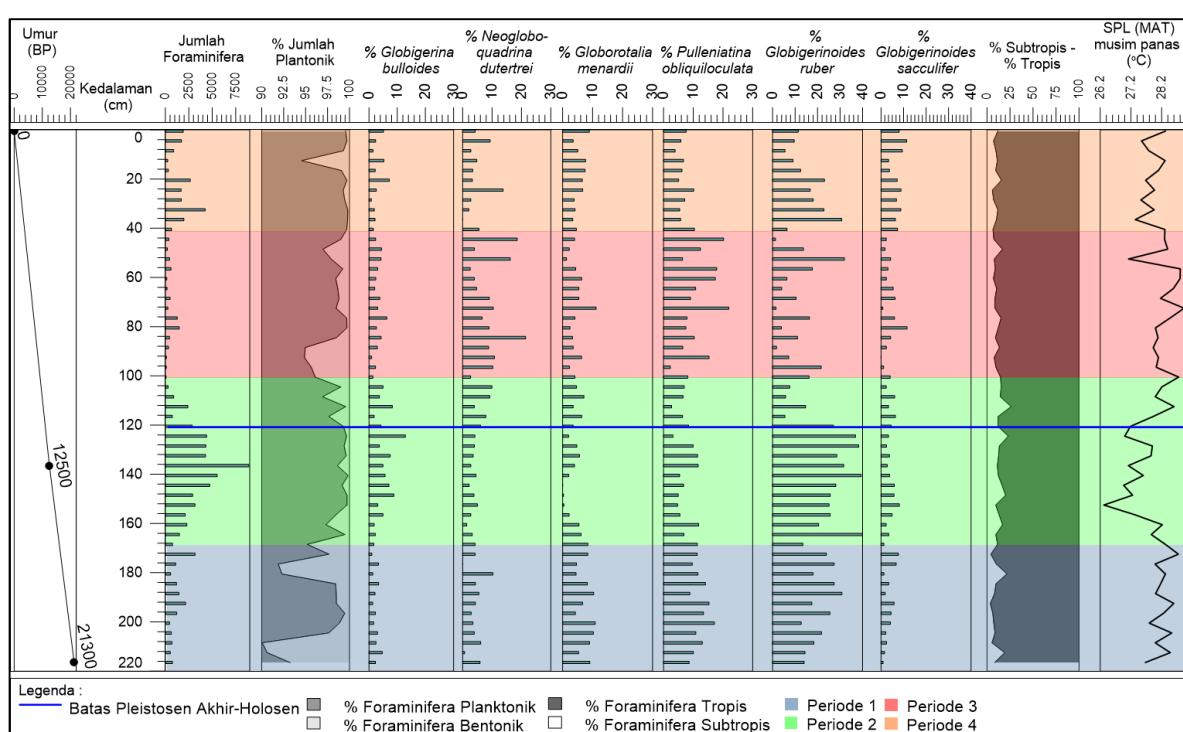
Berdasarkan hasil analisis foraminifera terdapat 32 spesies foraminifera planktonik dan 19 spesies foraminifera bentonik. Kehadiran foraminifera planktonik mendominasi seluruh sampel sedimen EW17-08. Jumlah rata-rata foraminifera planktonik 1634 individu/10 gram. Jumlah foraminifera planktonik terendah yaitu 72 individu/10 gram pada kedalaman 100-101 cm. Sedangkan jumlah foraminifera planktonik terbanyak yaitu 8800 individu/10 gram pada kedalaman 136-137 cm.

Kehadiran foraminifera bentonik sangat rendah kelimpahannya pada setiap interval sampel. Jumlah rata-rata foraminifera bentonik 20 individu/10 gram. Jumlah foraminifera bentonik terendah yaitu 2 individu/10 gram pada kedalaman 40-41, 60-61, dan 64-65 cm. Sedangkan jumlah foraminifera bentonik terbanyak yaitu 122 individu/10 gram pada kedalaman 136-137 cm.

Kehadiran foraminifera bentonik lebih sedikit dibandingkan foraminifera planktonik yaitu rata-rata <10 individu/10 gram. Beberapa spesies foraminifera bentonik yang mendominasi *Cibicides* sp. dengan rata-rata 7 individu/10 gram, *Uvigerina* sp. dengan rata-

rata 3 individu/10 gram, *Bulimina* sp., *Lagena* sp., dan *Pyrgo* sp. dengan rata-rata 2 individu/10 gram, dan *Pullenia bulloides* dengan rata-rata 1 individu/10 gram. Kehadiran spesies lainnya sangat jarang diantaranya adalah *Heterolepa dutemplei*, *Bulimina exilis*, *Dentalina* sp., *Nonion* sp., *Bolivina* sp., *Melonis* sp., *Fissurina* sp., *Miliolinidae* sp., *Textularia* sp., *Rotaliida* sp., *Triloculina* sp., *Nodosaria* sp., dan *Eggerella bradyi*. Kumpulan foraminifera bentonik ini mencirikan lingkungan laut dalam (Murray, 2009; Haq dan Boersma, 1998; Barker, 1960). Menurut Boltovskoy dan Wright (1976) jumlah spesies foraminifera bentonik terdiri dari 19 spesies dikategorikan berada pada lingkungan laut dalam.

Beberapa spesies foraminifera planktonik hadir mendominasi diantaranya adalah *Globigerinoides ruber* dengan rata-rata 407 individu/10 gram, *Pulleniatina obliquiloculata* dengan rata-rata 135 individu/10 gram dan *Globigerinoides immaturus* dengan rata-rata 130 individu/10 gram. Dominasi kumpulan foraminifera planktonik tersebut menunjukkan karakter daerah tropis (Boltovskoy dan Wright, 1976).



**Gambar 2.** Hasil analisis foraminifera (total kelimpahan, petunjuk upwelling, kelompok tropis-subtropis, dan SPL musim panas di daerah penelitian EW17-08.

Berdasarkan total kelimpahan, foraminifera melimpah pada Pleistosen Akhir yang relatif lebih dingin dibandingkan Holosen. Terlihat pada kedalaman 100-160 cm terjadi peningkatan kelimpahan foraminifera sedangkan pada kedalaman 100-40 cm kelimpahan foraminifera menurun drastis. Hal ini diperkirakan pada kedalaman 100-160 cm terjadi peningkatan intensitas *upwelling* yang terlihat pada peningkatan *Globigerina bulloides* (**Gambar 2**). Berdasarkan umur hasil interpolasi terhadap data pentarikhan radiocarbon, kedalaman 100-160 cm berumur 9.220-15.140 BP.

Menurut Martinez dkk. (1998) perubahan kelimpahan foraminifera *Globigerina bulloides* berkaitan dengan ketebalan kolom *mixed layer* dan sistem *upwelling*. Hal ini menyebabkan kelimpahan foraminifera tertinggi dibandingkan periode lainnya. Kelimpahan foraminifera pada periode tersebut menunjukkan peningkatan nutrisi sehingga foraminifera berkembang biak dengan baik seperti yang ditunjukkan oleh kelimpahan *Neogloboquadrina dutertrei*, *Globorotalia menardii*, *Pulleniatina obliquiloculata*, *Globigerinoides ruber*, dan *Globigerinoides sacculifer* (Spooner dkk., 2005; Ding dkk., 2006; Mohtadi dkk., 2009; Gustiantini dkk., 2018; **Tabel 2**).

Pada kedalaman 120-160 cm, kondisi perairan dikaitkan dengan penguatan muson tenggara selama Pleistosen Akhir yang kemungkinan menyebabkan peningkatan intensitas *upwelling* (Martinez dkk., 1999; Takahashi dan Okada, 2000; Gingele dkk., 2002). Data *upwelling* penelitian ini didukung oleh penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa terjadi peningkatan *upwelling* pada ~14.000-9.000 BP di perairan barat Pulau Sumatra (Murgese dkk., 2008).

Penurunan drastis kelimpahan foraminifera pada kedalaman 100-40 cm diperkirakan akibat intensitas *upwelling* yang menurun sehingga nutrisi untuk perkembangbiakan foraminifera berkurang. Hal ini terlihat dari penurunan kelimpahan *Globigerina bulloides*.

Secara umum, daerah penelitian berada di perairan dengan kondisi salinitas yang rendah (Murgese dkk., 2008). Hal ini dibuktikan oleh kelimpahan *Globigerinoides ruber* yang lebih banyak daripada *Globigerinoides sacculifer*. Distribusi *Globigerinoides ruber* dan *Globigerinoides sacculifer* tidak bergantung pada SPL tetapi pada kondisi salinitas yaitu *Globigerinoides ruber* akan melimpah pada salinitas yang rendah, sedangkan *Globigerinoides sacculifer* melimpah pada kondisi salinitas normal (Boltovskoy dan Wright, 1976). Kondisi salinitas yang rendah dapat menghambat perkembangbiakan beberapa foraminifera sehingga terjadi penurunan jumlah foraminifera (Murgese dkk., 2008). Rendahnya kelimpahan jumlah foraminifera pada interval lainnya selain pada kedalaman 100-160 cm (*zona upwelling*) kemungkinan besar dipengaruhi oleh kondisi salinitas yang rendah. Menurut beberapa peneliti terdahulu wilayah perairan Sumatra dicirikan dengan kondisi salinitas yang rendah karena pengaruh dari tingginya presipitasi dan input sedimen darat dari Sumatra dan pulau sekitar (pada penelitian ini Pulau Simeulue) (Murgese dkk., 2008; Mohtadi dkk., 2010; Cahyarini, 2013; Nugroho dkk., 2021).

Untuk mendapatkan data SPL sejak Pleistosen Akhir hingga Resen (21.300-0 BP) di daerah penelitian, nilai SPL dihitung berdasarkan hasil analisis menggunakan metode *Modern Analogue Technique (MAT)* dengan bantuan perangkat lunak ANALOG, terpilih 10 data SPL yang lokasinya berdekatan dengan lokasi penelitian, data tersebut kemudian dirata-ratakan. Nilai rata-rata jarak (d) dari seluruh sampel ke daerah penelitian adalah  $0.5 < d < 0.3$ . Nilai rata-rata jarak tersebut diartikan nilai SPL memiliki kemiripan dengan nilai SPL di daerah penelitian ini. Nilai rata-rata SPL bulan Juni, Juli, dan Agustus dipilih sebagai nilai SPL musim panas.

**Tabel 2.** Distribusi Foraminifera Planktonik  
(jumlah specimen per spesies).

Kedalaman	<i>Globigerinoides ruber</i>	<i>Globigerinoides sacculifer</i>	<i>Globigerina bulloides</i>	<i>Globorotalia menardii</i>	<i>Neogloboquadrina dutertrei</i>	<i>Pulleniatina obliquiloculata</i>	Jumlah Planktonik	Kedalaman	<i>Globigerinoides ruber</i>	<i>Globigerinoides sacculifer</i>	<i>Globigerina bulloides</i>	<i>Globorotalia menardii</i>	<i>Neogloboquadrina dutertrei</i>	<i>Pulleniatina obliquiloculata</i>	Jumlah Planktonik
	0-1	217	153	96	169	80	145	1897	112-113	351	79	198	84	94	64
4-5	165	195	40	60	160	100	1713	116-117	39	46	13	46	57	46	724
8-9	49	83	12	45	24	35	882	120-121	766	128	120	100	172	239	2838
12-13	22	8	13	18	11	16	240	124-125	1761	158	616	95	197	150	4777
16-17	40	12	7	24	11	20	321	128-129	1644	105	158	204	171	427	4295
20-21	612	191	191	175	87	135	2655	132-133	1217	160	320	240	152	488	4268
24-25	279	148	43	112	229	169	1666	136-137	2783	243	435	348	243	1026	8800
28-29	306	116	14	65	46	121	1693	140-141	2171	209	314	113	249	297	5515
32-33	966	372	79	174	87	230	4238	144-145	1319	276	332	0	103	316	4692
36-37	606	125	42	67	0	113	1972	148-149	742	167	255	8	112	144	2894
40-41	42	48	10	30	36	68	659	152-153	792	257	98	13	158	150	3155
44-45	5	9	9	15	69	75	372	156-157	532	102	102	45	57	114	2077
48-49	29	4	9	5	8	26	212	160-161	458	51	41	122	31	264	2238
52-53	140	19	19	6	71	28	438	164-165	603	51	33	92	49	103	1496
56-57	105	18	18	26	15	106	595	168-169	98	9	12	61	31	83	731
60-61	10	4	4	10	6	27	155	172-173	738	237	30	259	129	349	3088
64-65	7	10	4	10	9	20	182	176-177	276	68	34	47	0	98	1009
68-69	52	31	19	27	45	45	498	180-181	93	7	7	23	53	60	518
72-73	4	2	8	29	27	57	259	184-185	320	40	40	96	50	165	1170
76-77	207	76	80	52	83	99	1264	188-189	439	26	30	148	78	126	1424
80-81	57	170	38	36	132	111	1471	192-193	371	124	27	142	92	325	2123
84-85	49	19	19	14	94	45	439	196-197	307	54	27	51	35	162	1206
88-89	6	8	9	11	28	21	321	200-201	56	18	7	48	15	75	441
92-93	8	0	1	7	12	17	111	204-205	135	13	19	64	24	68	621
96-97	21	1	2	2	10	2	99	208-209	116	15	15	56	39	82	629
100-101	12	3	1	3	2	6	72	212-213	68	7	22	25	3	48	474
104-105	23	7	15	14	29	21	297	216-217	99	6	16	64	41	61	705
108-109	50	52	32	61	79	57	860								

Pada Pleistosen Akhir dan Holosen, rata-rata SPL dan kelimpahan foraminifera petunjuk subtropis dan tropis tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan (**Gambar 2**). Berdasarkan kelimpahan foraminifera pada Pleistosen Akhir rata-rata SPL adalah 27.78°C dan pada Holosen rata-rata SPL adalah 28.15°C. Hasil tersebut menunjukkan Pleistosen Akhir relatif sedikit lebih dingin dibandingkan Holosen. Selain itu, kelimpahan foraminifera kelompok subtropis sedikit lebih banyak pada Pleistosen Akhir dan berkurang pada Holosen (**Gambar 2**). Perubahan persentase kelimpahan foraminifera planktonik kelompok tropis dan subtropis tidak terlalu signifikan pada Pleistosen Akhir-Holosen disebabkan karena daerah penelitian terletak di ekuatorial dan bagian timur *Indo-Pacific Warm Pool (IPWP)* yang SPLnya dipengaruhi radiasi sinar matahari sepanjang tahun (Li dkk., 2018).

Berdasarkan data SPL musim panas dan foraminifera kelompok tropis-subtropis, daerah penelitian dibagi menjadi 4 (empat) periode variasi iklim.

(1) Kedalaman 160-217 cm (Pleistosen Akhir; 21.300-15.140 BP), kondisi rata-rata SPL relatif hangat yaitu 28.17°C. Kelimpahan foraminifera kelompok subtropis rendah. Periode 1 menunjukkan kondisi iklim yang relatif hangat. Periode ini diinterpretasikan berkaitan dengan berakhirnya peristiwa *Last Glacial* yang dingin dan menjadi awal deglasiasi yang hangat pada Pleistosen Akhir (Ruddiman, 2001).

(2) Kedalaman 160-120 cm (Pleistosen Akhir; 15.140-11.040 BP), kondisi rata-rata SPL relatif dingin yaitu 27.2°C. Kelimpahan foraminifera kelompok subtropis meningkat dan terjadi peningkatan intensitas *upwelling*. Periode 2 menunjukkan kondisi iklim yang relatif dingin dibandingkan periode sebelumnya. Kondisi ini kemungkinan berkaitan dengan peristiwa bumi yang menjadi lebih dingin di akhir Pleistosen sebelum memasuki Holosen yang hangat. Berdasarkan penelitian terdahulu terdapat beberapa peristiwa pendinginan bumi yang terjadi secara mendadak pada Pleistosen Akhir (~15.000-10.000 BP) seperti *Oldest Dryas*, *Older*

*Dryas*, dan *Younger Dryas* (Benson dkk., 1997; Bradley, 1999)

- (3) Kedalaman 44-120 cm (Holosen Awal-Tengah; 11.040-4.110 BP), kondisi rata-rata SPL relatif hangat yaitu 28.27°C. Kelimpahan foraminifera kelompok subtropis sangat sedikit. Di awal Holosen masih dipengaruhi oleh intensitas *upwelling*. Periode 3 menunjukkan kondisi Holosen yang hangat bahkan SPL tertinggi terdapat pada kedalaman 71-72 cm yaitu 28.93 °C. Kondisi ini kemungkinan dipengaruhi oleh beberapa peristiwa perubahan iklim menjadi lebih hangat pada awal-tengah Holosen seperti *Preboreal*, *Boreal*, *Holocene Thermal Maximum* (Cronin, 1999; Abram dkk., 2007). Selain itu terjadi peningkatan intensitas muson barat laut pada Holosen Awal yang menyebabkan tingginya SPL dan peningkatan intensitas curah hujan di daerah penelitian (Murgese dkk., 2008; Li dkk., 2018).
- (4) Kedalaman 0-44 cm (Holosen Akhir; 4.110-0 BP), kondisi rata-rata SPL relatif lebih dingin dari Holosen Awal-Tengah yaitu 27.89°C. Periode 4 menunjukkan kondisi iklim yang relatif lebih dingin dibandingkan periode sebelumnya. Kondisi ini kemungkinan dipengaruhi oleh beberapa peristiwa perubahan iklim seperti *Subboreal* dan *Little Ice Age* (Wanner dkk., 2008). Selain itu pada Holosen Akhir, intensitas muson barat laut melemah dan terjadi pergeseran *Indo-Pacific Warm Pool (IPWP)* ke arah timur yang menyebabkan wilayah perairan barat Indonesia lebih dingin dan lebih dipengaruhi oleh muson tenggara (Abram dkk., 2007; Li dkk., 2018).

Habibi (2018) dan Pamungkas (2018) menyatakan perubahan SPL di perairan sekitar Pulau Simeulue terjadi beberapa kali sejak Pleistosen Akhir. Kondisi iklim dan oseanografi pada Pleistosen Akhir dan Holosen di perairan barat Sumatra tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan (Murgese dkk., 2008; Mohtadi dkk., 2010). Bahkan periode iklim seperti *Younger Dryas* dan *Bølling/Allerød Interstadial*, perubahan SPL tidak dapat teridentifikasi dengan baik

(Mohtadi dkk., 2010). Pada saat *Younger Dryas* terjadi, deglasiasi berlangsung tanpa ada gangguan sama sekali (Murgese dkk., 2008; Mohtadi dkk., 2010).

#### 4. KESIMPULAN

Hasil analisis terhadap kumpulan foraminifera pada sampel EW17-08 menunjukkan terjadi perubahan SPL dan adanya peningkatan intensitas *upwelling* pada Pleistosen Akhir yaitu pada kedalaman 100-160 cm. Berdasarkan hasil analisis SPL menggunakan metode MAT, rata-rata SPL pada Pleistosen Akhir lebih dingin dari Holosen meskipun perbedaan SPL tidak terlalu signifikan.

Peningkatan intensitas *upwelling* di daerah penelitian pada kedalaman 100-160 cm berdasarkan kelimpahan *Globigerina bulloides*, *Neogloboquadrina dutertrei*, *Globorotalia menardii*, *Pulleniatina obliquiloculata*, *Globigerinoides ruber*, dan *Globigerinoides sacculifer*. Total foraminifera cukup melimpah pada kedalaman tersebut.

Pada Holosen Awal-Tengah yaitu pada kedalaman 40-100 cm kelimpahan foraminifera menurun drastis yang diinterpretasi sebagai penurunan intensitas *upwelling* dan pengaruh kondisi ekologi yaitu salinitas yang rendah. Variasi iklim sejak Pleistosen Akhir hingga Resen (~21.300-0 BP) di daerah penelitian dibagi menjadi 4 periode berdasarkan kondisi SPL dan kelimpahan foraminifera kelompok tropis-subtropis. Periode 1 (rata-rata SPL 28.17°C) dan Periode 3 (rata-rata SPL 28.27°C) menunjukkan kondisi iklim yang relatif hangat sedangkan Periode 2 (rata-rata SPL 27.2°C) dan Periode 4 (rata-rata SPL 27.89°C) menunjukkan kondisi iklim yang relatif dingin.

#### 5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian Oseanografi yang telah memberikan izin untuk menggunakan salah satu data Ekspedisi Widya Nusantara 2017 yaitu inti sedimen laut dalam EW17-08 dan Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI yang telah

memberikan izin atas penggunaan fasilitas laboratorium.

#### REFERENSI

- Abram, N.J., Gagan, M.K., Liu, Z., Hantoro, W., McCulloch, T. M., Suwargadi, B.W. (2007): Seasonal Characteristics of The Indian Ocean Dipole during The Holocene Epoch, *Nature*, **445**, 299-302.
- Ardi, R.D.W., Maryunani, K. A., Yulianto, E., Putra, P. S., dan Nugroho, S. H. (2019): Biostratigrafi Dan Analisis Perubahan Kedalaman Termoklin Di Lepas Pantai Barat Daya Sumba Sejak Pleistosen Akhir Berdasarkan Kumpulan Foraminifera Planktonik, *Bulletin of Geology*, 358.
- Barker, R. W. (1960): Taxonomic Notes on The Species Figures by H.B. Brady in His Report on The Foraminifera Dredged by H.M.S. Challenger During Years 1873-1876, *Society of Economic Paleontologist and Mineralogist Special Publication*, **9**(24), 24-238.
- Benson, L., Burdett, J., Lund, S., Kashgarian, M., dan Mensing, S. (1997): Nearly synchronous climate change in the Northern Hemisphere during the last glacial termination, *Letters to Nature*, **388**, 263 – 265
- Blow, W.H. (1970): Validity of Biostratigraphiccorrelations Based on The Globigerinacea. *Micropaleontology* **16**, 257–268.
- Bolli, H.M., Saunders, J.B., Perch-Nielsen, K. (1985): *Plankton Stratigraphy*.
- Boltovskoy, E. dan Wright, R. (1976): *Recent Foraminifera*, Springer Science Business Media, 127.
- Bradley, R. S. (2015): *Paleoclimatology: Reconstructing Climates of the Quaternary*, Third Edit, Oxford: Elsevier.
- Cahyarini, S.Y. (2013): Seasonal Mean Variability of Coral-based Sea Surface Salinity from Simeulue, Mentawai, Bunaken, and Bali, *Indonesian Journal of Geology*, **8**, 119-125.
- Cronin, T. M. (1999): *Principles of Paleoclimatology*, New York: Columbia University Press.

- Damanik, A., Maryunani, K. A., Nugroho, S. H., dan Putra, P. S. (2020): Rekonstruksi perubahan suhu permukaan laut berdasarkan kumpulan foraminifera di Perairan Utara Papua, Samudra Pasifik, *Bulletin of Geology*, **4**(1), 496-504.
- Dennison, J.M. dan Hay, W.W. (1967): Estimating the needed sampling area for subaquatic ecologic studies. *J. Paleontol.* **41**, 706–708.
- Ding, X., Bassinot, F., Guichard, F., Li, Q.Y., Fang, N.Q., Labeyrie, L., Xin, R.C., Adisaputra, M.K., dan Hardjawidjaksana, K. (2006): Distribution and ecology of planktonic foraminifera from the seas around the Indonesian Archipelago, *Marine Micropaleontology*, **58**, 114–134.
- Gennari, G., Spezzaferri, S., Comas, M., Rüggeberg, A., López-Rodríguez, C., dan Pinheiro, L. (2013): Sedimentary sources of the mud-breccia and mud volcanic activity in the Western Alboran Basin. *Marine Geology*, **339**.
- Gingege, F.X., De Deckker, P., Girault, A., Guichard, F. (2002): High-resolution history of the South Java Current during the past 80 Ka. *Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol.* **183**, 247–260.
- Gustiantini, L., Piranti, S.A., Zuraida, R., Hyun, S., Ranawijaya, D.A.S., dan Harkinz, EX. (2018): Foraminiferal Analysis Related to Paleoceanographic Changes of Arafura Sea and Surrounding During Holocene, *Bulletin of the Marine Geology*, **33**, 105-108.
- Habibi, A.F. (2018): *Identifikasi Perubahan Iklim Terhadap Karakter Endapan Laut Dan Foraminifera Pada Sampel Marine Core Perairan Barat Sumatra*, Skripsi Program Sarjana, Institut Teknologi Bandung.
- Haq, B. U. dan Boersma A. (1998): *Introduction to Marine Micropaleontology*, Elsevier, 44.
- Kuhnert, H., Kuhlmann, H., Mohtadi, M., Meggers, H., Baumann, K-H., dan Pätzold, J. (2014): Holocene Tropical Western Indian Ocean Sea Surface Temperatures in Covariation with Climatic Changes in The Indonesian Region, *Paleoceanography*, 423-437.
- Li, Z., Xuefa S., Min-Te C., Houjie W., Shengfa L., Jian X., Haiyan L., Rainer Arief T., Rina Z., Eko T. (2016): Late Quaternary Fingerprints of Precession and Sea Level Variation Over The Past 35 kyr as Revealed by Sea Surface Temperature and Upwelling Records from The Indian Ocean Near Southernmost Sumatra, *Quaternary International*, **xxx**, 1-10.
- Li, Z., Chen, M. T., Lin, D. C., Wang, H., Shi, X., Liu, S., Yokoyama, Y., Yamamoto, M., Shen, C-C., Mii, H-S., Troa, R.A., Zuraida, R., Triarso, E., dan Hendrizan, M. (2018): Holocene Surface Hydroclimate Changes in The Indo-Pacific Warm Pool. *Quaternary International*, **482**, 1-12.
- Martinez, I.J., Taylor, L., De Deckker, P., Barrows, T.T. (1998): Planktic Foraminifera from the Eastern Indian Ocean: Distribution and Ecology In Relation Of The Western Pacific Warm Pool (WPWP). *Marine Micropaleontology*, **34**, 121–151.
- Maryunani, K. A. (2009): *Pendekatan Mikrofossil Berdasarkan Data Teluk Cendrawasih untuk Meinginterpretasi dan Merekonstruksi Paleoklimat dan Paleoseanografi Di Ekuatorial Pasifik Barat sejak Zaman Es Terakhir (Pleistosen Akhir)*, Disertasi Program Doktor, Institut Teknologi Bandung.
- Mohtadi, M., Steinke, S., Groeneveld, J., Fink, H.G., Rixen, T., Hebbeln, D., Donner, B., dan Herunadi, B. (2009): Low-latitude control on seasonal and interannual changes in planktonic foraminiferal flux and shell geochemistry off South Java: A sediment trap study, *Paleoceanography*, **24**, 1–20.
- Mohtadi, M., Steinke, S., Lückge, A., Groeneveld, J., Hathorne, E.C. (2010): Glacial to Holocene Surface Hydrography of The Tropical Eastern Indian Ocean, *Earth and Planetary Science Letters*, **292**, 89-97.
- Murgeze, D., Deckker, P., Spooner, M., dan Young, M. (2008): A 35,000 year Record of Changes in the Eastern Indian Ocean Offshore Sumatra, *Palaeogeography*,

- Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **265**, 195-213.
- Murray, J.W. (2009): *Ecology and Application of Benthic Foraminifera*, Cambridge University Press, 151-152.
- Mustikasari, E., Dewi, L.C., Heriati, A., dan Pranowo, W.S. (2015): Pemodelan Pola Arus Barotropik Musiman 3 Dimensi (3d) untuk Mensimulasikan Fenomena Upwelling di Perairan Indonesia, *Jurnal Segara*, **1**, 25-35.
- Nugroho, S. H., Putra, P. S., dan Pamungkas, A. D. G. (2020): Karakteristik sedimen Holosen – Pleistosen berdasarkan ukuran butir pada sedimen inti EW17-08, tepi barat laut Paparan Sunda. *Jurnal Geosaintek*, **6**(2), 107-116.
- Nugroho, S. H., dan Putra, P. S. (2020): Determining textural and geochemical element characteristics of seafloor sediment using multivariate analysis along the Simeulue Sub-basin, Indonesia. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, **35**, 79-92.
- Nugroho, S.H., Zaim, Y., Yulianto, E., Rizal, Y., Kurniasih, A., Putra, P.S., Wibowo, S.P.A.W., Amar, A. (2021): A preliminary study in vertical distribution of planktonic foraminifera and marine ecological conditions of Simeulue Sub-Basin, Aceh, Indonesia, *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*. (accepted).
- Ohkushi, K., Uchida, M., dan Shibata, Y. (2017): Radiocarbon age differences between benthic-planktonic foraminifera in sediment cores from the Shatsky Rise, central North Pacific. *Journal of the Sedimentological Society of Japan*, **76**, 17-27.
- Pamungkas, A. D. G. (2018): *Karakteristik Sedimen Dan Analisis Paleoklimat Pada Kala Holosen Dan Pleistosen Di Perairan Barat Sumatra*, Skripsi Program Sarjana, Institut Teknologi Bandung.
- Ruddiman, W.F. (2001): *Earth's Climate: Past and Future*. Freeman and Company.
- Silubun, D. T., Gaol, J. L., Naulita Y. (2015): Estimasi Intensitas Upwelling Pantai Dari Satelit Aquamodis Di Perairan Selatan Jawa Dan Barat Sumatra, *Jurnal Teknologi Perikanan dan Kelautan*, **Vol. 6**, 21-29.
- Spooner, M.I., Barrows, T.T., de Deckker, P., dan Paterne, M. (2005): Palaeoceanography of the Banda Sea, and Late Pleistocene initiation of Foraminiferal Analysis Related to Paleoceanographic Changes of Arafura Sea and Surrounding During Holocene 115 the Northwest Monsoon, *Global and Planetary Change*, **49**, 28–46.
- Susanto, R.D., Gordon, A.L., dan Zheng, Q. (2001): Upwelling along the coasts of Java and Sumatra and its relation to ENSO, *Geophysical Research Letters*, **28**, 1599-1602.
- Schweitzer, P. N. (1998): ANALOG, merupakan perangkat lunak terbuka untuk memperkirakan parameter-parameter paleoklimat menggunakan metode MAT, dipublikasikan oleh U.S. Geological Survey, data diperoleh melalui situs internet:<http://pubs.usgs.gov/of/1994/of94-645>. Diunduh pada tanggal 10 Desember 2020.
- Takahashi, K., Okada, H. (2000): The paleoceanography for the last 30,000 years in the southeastern Indian Ocean by means of calcareous nannofossils. *Mar. Micropaleontol.* **40**, 83–103.
- Wanner, H., Beer, J., Butikofer, J., Crowley, T. J., Cubasch, U., Fluckiger, J., Goosse, H., Grosjean, M., Joos, F., Kaplan, J. O., Kuttel, M., Muller, S. A., Prentice, I. C., Solomina, O., Stocker, T. F., Tarasov, P., Wagner, M., dan Widmann, M. (2008): Mid- to Late Holocene climate change: an overview, *Quaternary Science Reviews*, **27**, 1791 – 1828.