

REKAM SEDIMEN INTI UNTUK MEMPERKIRAKAN PERUBAHAN LINGKUNGAN DI PERAIRAN LERENG KANGEAN

CORE SEDIMENT RECORDS TO PREDICT ENVIRONMENTAL CHANGES IN KANGEAN SLOPE WATERS

Yani Permanawati^[1,2], T. Prartono^[1], A. S. Atmadipoera^[1], Rina Zuraida^[2], Y. Chang^[3]

[1] Departemen. ITK, IPB, Jl. Raya Dramaga, Bogor-16680, email: yanipw@yahoo.com

[2] Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan, Jl. Dr. Djundjuran no 236, Bandung-40174

[3] Dept. of Oceanography, NSYSU, Taiwan, R.O.C.

Diterima : 10-12-2015, Disetujui : 08-08-2016

ABSTRAK

Sedimen inti dianalisis secara vertikal untuk memprediksi perubahan lingkungan saat sedimen terendapkan. Perairan segitiga Laut Jawa-Selat Makassar-Laut Flores (JMF) dilalui jalur arus lintas Indonesia/ARLINDO. Distribusi aliran ARLINDO yang masuk ke Selat Makassar terbagi dua arah aliran karena adanya Ambang Dewakang. Satu mengalir ke arah Tenggara melalui Laut Flores, sementara itu aliran lainnya bergerak ke arah Baratdaya menuju Selat Lombok melalui Laut Jawa. Penelitian ini menganalisis sedimen inti dari perairan Laut Jawa yang diwakili oleh Lereng Kangean. Metode penelitian menggunakan metode *non-destructive* yaitu pengamatan megaskopis dan pemindaian, dan metode *destructive* yaitu pencuplikan sistematis menggunakan 2 cm setiap interval 4 cm. Hasil cluster menunjukkan proses pengendapan tampak relatif seragam (88-0 cm) dari analisis sembilan variabel, antara lain: ukuran butir (*mean*) antara lempung-pasir sangat halus, kecerahan sedimen (L^*) sekitar 40,14-44,17, kerentanan magnet (*Magnetik Susceptibility/MS*) sekitar 13,60-116,70, karbonat biogenik (BC) dari pengamatan mikroskopis sekitar 3-10%, karbonat sekitar 17,36-50,17%, *Total Organic Carbon* (TOC) sekitar 0,76-2,01%, C/N sekitar 9,11-13,57, $\ln K/Ti$ sekitar 0,58-1,09, dan $\ln Mn/Cl$ sekitar -4,97- -4,24. Interpretasi karakter sedimen dari hasil deskriptif *Principal Component Analysis/PCA* menunjukkan penciri utama/F1 sebesar 28,10% dicirikan oleh pengaruh kuat dari variabel MS, $\ln K/Ti$, dan $\ln Mn/Cl$, menggambarkan karakter sedimen dengan pengaruh yang kuat dari daratan.

Kata kunci: analisis vertikal, perubahan lingkungan, arus lintas Indonesia, karakter sedimen, penciri utama

ABSTRACT

A core sediment was vertically analyzed to predict environmental changes of the sediments deposition. Triangle waters of Java Sea-Makassar Strait-Flores Sea (JMF) are traversed by the Indonesian Throughflow or ARLINDO. Distribution of ARLINDO splitted by morphological condition of the Dewakang Sill : Southeast ward of the Flores Sea and Southwest ward of the Lombok Strait through the Java Sea. The purpose of this study is to elaborate characteristics of the Kangean Slope's core sediment corresponding to the Java Sea. The research method using non-destructive such as megaskopis and scanning method, and destructive such as sampling method which used 2 cm every interval 4 cm. The cluster analysis showed that deposition process seemed of one kind (88-0 cm) by nine variables. They are : main of grain size between clay to lower very fine sand, lightness sediment (L^) about 40,14-44,17, Magnetic Susceptibility (MS) about 13,60-116,70, biogenic carbonate (BC) by microscopic observation about 3-10%, carbonate about 17,36-50,17%, Total Organic Carbon (TOC) about 0,76-2,01%, C/N ratio about 9,11-13,57, $\ln K / Ti$ about 0,58-1,09, and $\ln Mn / Cl$ about -4,97- -4,24. Sediment character by Principal Component Analysis/PCA showed principle component/F1 as 28,10% indicated Magnetic Susceptibility (MS) and $\ln K/Ti$ and $\ln Mn/Cl$ were the main character of the Kangean Slope's sediment and suggested to very strong influence from mainland.*

Keywords: *vertically analysis, environmental changes, Indonesian throughflow, sediment character, principle component*

PENDAHULUAN

Sedimen laut merupakan hasil deposisi materi berstrata dimana karakter atau sifat materi dipengaruhi oleh sumber pasokan dan proses selama pengendapan. Karakteristik sedimen laut merupakan hasil endapan sebagai rekaman dari interaksi daratan, lautan dan udara (Bruland dan Lohan, 2004; Segar, 2012; Pinet, 2014). Pengaruh daratan yang terekam berupa material asal darat (*terrigenous*) yang diangkut ke laut oleh sungai maupun limpasan hujan dan keduanya dipengaruhi oleh tingginya curah hujan (Yao dkk., 2012; Yun dkk., 2015). Pengaruh lautan terekam dalam sedimen berupa pengaruh karakteristik air laut terhadap reaksi fisik dan kimia (Zhou dkk., 2014).

Perubahan lingkungan yang diakibatkan pengaruh daratan, lautan atau udara dapat langsung terekam dalam lapisan sedimen. Lapisan sedimen inti dapat memberikan informasi kondisi lingkungan masa lalu (*paleoenvironment*). Sedimen laut terdiri dari material-material berbagai sumber, mengandung organik dan anorganik baik terlarut atau tersuspensi (Rifardi, 2012) dengan berbagai tekstur sedimen yang memiliki partikel tidak terkonsolidasi (Libes, 2009). Klasifikasi sumber sedimen laut menurut Pinet (2014) terbagi ke dalam lima kategori. Pertama, sedimen darat; butiran halus sampai kasar merupakan hasil dari pelapukan dan erosi dari batuan di daratan. Kedua, sedimen biogenik; butiran halus sampai kasar berasal dari bagian kasar organisme, seperti kerang dan pecahan cangkang. Ketiga, sedimen hidrogenik; partikel-partikel yang terdeposisi hasil reaksi kimia atau biokimia di air laut yang terdekat dengan permukaan dasar laut. Keempat, sedimen vulkanik; partikel-partikel yang terlepas dari gunung api, contohnya debu. Dan terakhir, sedimen kosmogenik; butiran sangat kecil, terbawa oleh angin, berasal dari luar angkasa dan cenderung tercampur dengan sedimen darat dan biogenik.

Selat Makassar merupakan salah satu wilayah perairan yang dilalui ARLINDO membawa massa air Samudera Pasifik bergerak menuju ke Samudera Hindia. Morfologi Selat Makassar (sekitar perairan Spermonde) membentuk *sill* (ambang) Dewakang pada kedalaman 680 meter (Gordon dkk., 2003). Keberadaan ambang membuat ARLINDO membentuk dua cabang alir, yaitu: satu mengalir melalui Laut Flores menuju Laut Banda dan keluar di Laut Timor dan Selat Ombai, sementara cabang lainnya mengalir melalui Selat Lombok (Gordon 2005; Susanto dkk., 2012; Radjawane dkk., 2014). Setahun terjadi dua kali

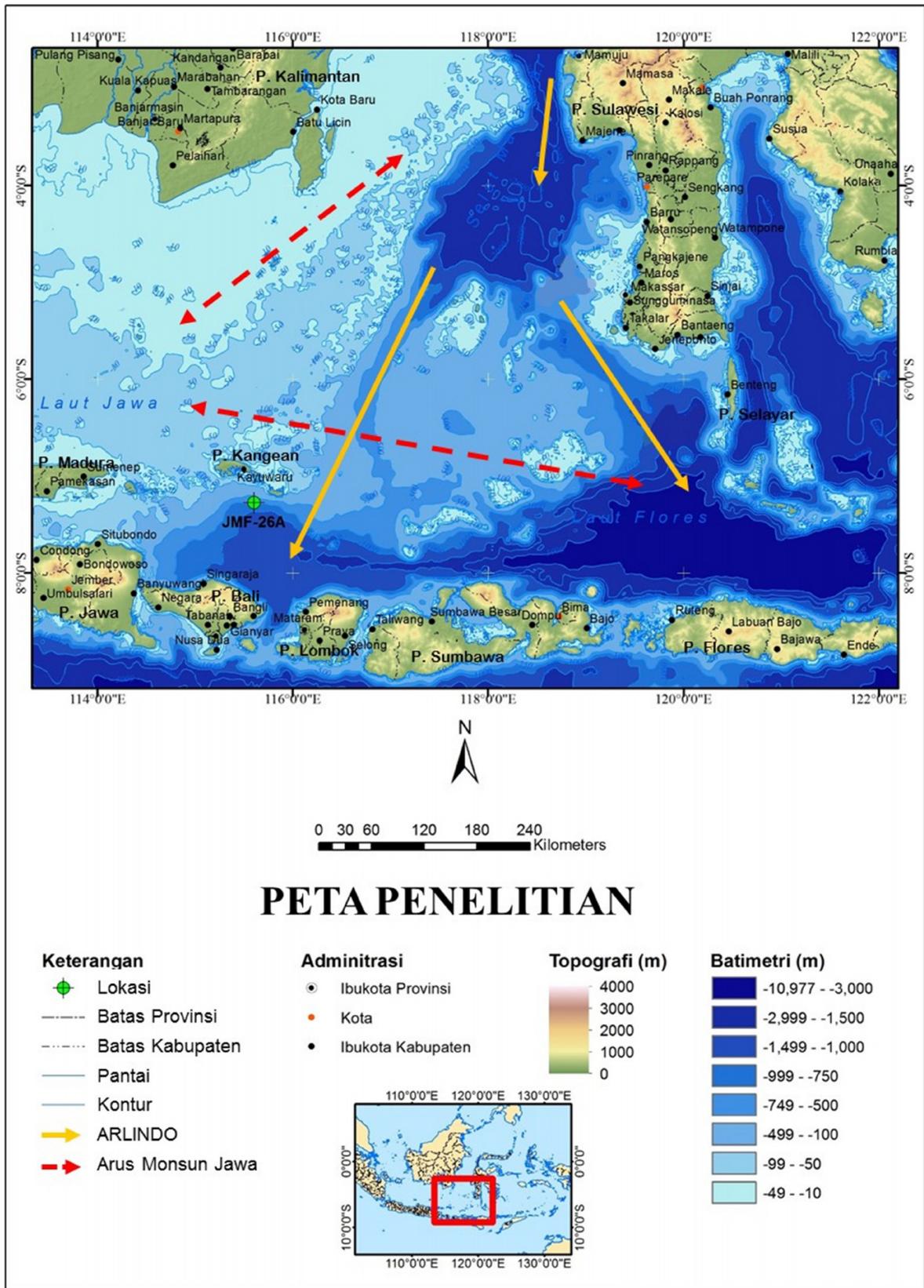
aliran Monsun dengan arah yang berlawanan (Gambar 1a). Tetapi pada saat monsun tenggara, massa air dari Laut Flores bertemu dengan massa air yang keluar dari Selat Makassar dan mengalir bersama ke Laut Jawa (Gordon 2005).

Sedimen inti berasal dari kegiatan Penelitian Lingkungan Geologi Kelautan Perairan Laut Jawa, Laut Sulawesi Selatan, hingga Laut Sawu dengan Menggunakan Kapal Riset Geomarin 3 (Zuraida dkk., 2015a). Titik lokasi sampel JMF26A berada pada koordinat 115°36'25.200"BT dan -7°16'29.028" LS. Sampel berupa sampel inti sedimen yang diambil dari kedalaman 632 m. Posisi kedalaman ini termasuk ke dalam wilayah lereng Paparan Sunda (*Slope of Sunda Shelf*) pada kedalaman batial (Sathiamurthy dan Voris, 2006; Segar, 2012).

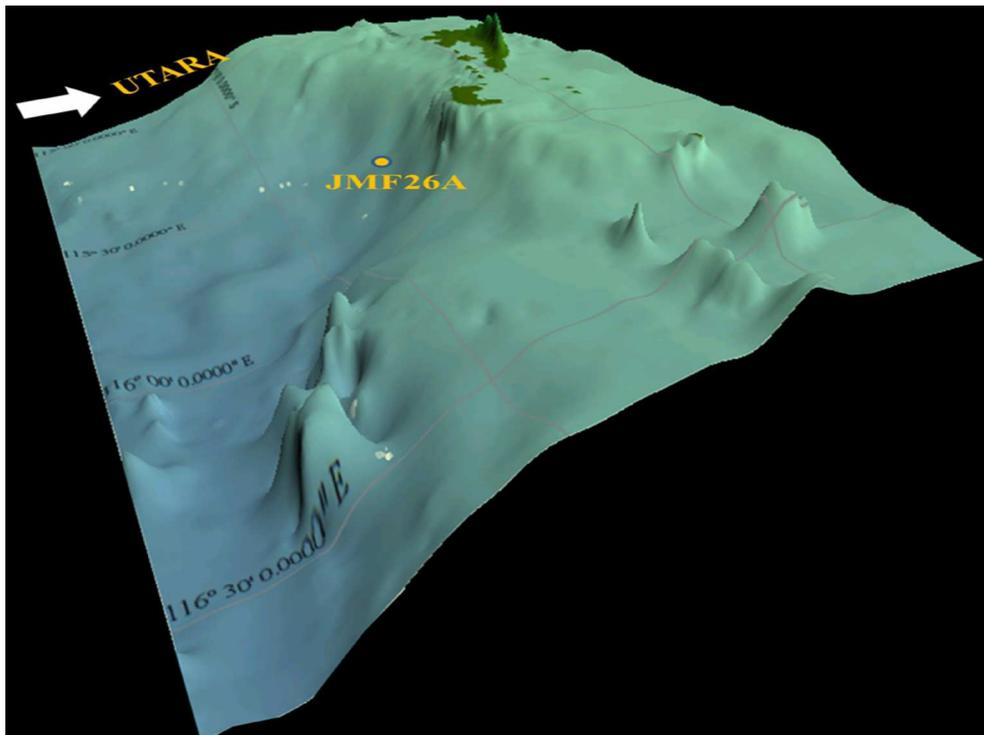
Penelitian mengenai informasi lingkungan masa lalu (*paleoenvironment*) telah banyak dilakukan, seperti: pengaruh siklus glasial interglasial terhadap vegetasi (Visser dkk., 2004; Zuraida dkk., 2015b), periode *terrigenous* tinggi (Briones dan Villalobos, 2009), perbedaan tekstur natural dari sedimentasi akibat aktifitas manusia (Qiao dkk., 2011), distribusi dan komposisi sebagai implikasi dari paleoseanografi (Sanchez dkk., 2013), distribusi pengaruh monsun (Yun dkk., 2015) dan lain-lain. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik sedimen sekitar lereng Kangean secara vertikal berkaitan dengan perubahan lingkungan masa lalu yang ditunjukkan oleh variabel penciri utama dari analisis multivariat PCA (*Principal Component Analysis*).

METODE

Metode analisis sampel inti sedimen Lereng Kangean menggunakan dua metode yaitu *non destructive* (pengamatan megaskopis dan pemindaian/*scanning*) dan *destructive* (pencuplikan sistematis). Metode pemindaian dianggap efektif untuk mendapatkan photo digital inti, warna kecerahan (L^*), kerentanan magnet sedimen (*Magnetik Susceptibility/MS*), dan XRF (*X-Ray Fluorescence*) resolusi tinggi karena tidak merusak, terukur secara menerus setiap 1 cm dan dalam waktu relatif cepat (Yao dkk., 2012). Metode pencuplikan sistematis dilakukan setiap 2 cm pada interval 4 cm dengan tujuan untuk mendapatkan data *biogenic carbonate* (BC) berdasarkan hasil mikroskopis, besar butir sedimen, karbonat, *total organic carbon* (TOC) dan *total nitrogen* (TN) untuk mendapatkan rasio C/N.



Gambar 1a. Lokasi pengambilan sampel sedimen inti (JMT26A)



(b)

Gambar 1b. Peta 3D untuk memperjelas morfologi dasar laut daerah penelitian (sumber peta: GEBCO_2014 modifikasi menggunakan perangkat lunak ArcMap 10.2.2 dan Global Mapper 15)

Pemindaian dilakukan bersamaan untuk mendapatkan foto digital sedimen, L*, MS, dan XRF. Alat yang digunakan adalah sistem rangkaian alat sensor *Multi Sensor Core Logger (MSCL) Geotek Handheld Type S*. Sensor untuk data L* menggunakan *Konica-Minolta CM2600d*. Sensor untuk data XRF menggunakan *Olympus Innov-X handheld XRF spectrometer*. Sensor untuk data MS menggunakan *Bartington MS2E point sensor* dengan intensitas rendah (sekitar 80A/m RMS).

Perlakuan cuplikan sedimen dilakukan sesuai peruntukan masing-masing analisis. Beragam alat digunakan pada beberapa jenis pengukuran dan dilakukan di beberapa tempat berbeda. Jenis pengukuran tersebut adalah: megaskopis dan mikroskopis menggunakan mikroskop jenis binokuler, panduan komparator besar butir PSG-KESDM dan manual *Munsell Soil Color Charts 1994* dilakukan di Laboratorium Contoh Inti P3GL di Cirebon dan Bandung; pengukuran besar butir sedimen menggunakan metoda granulometri (Zhou dkk., 2014) dilakukan di *Oceanography Laboratory, National Taiwan University, R.O.C.* menggunakan alat ukur *Grain Size Laser Diffraction Particle Size analyzer (LS 13 320)*; dan analisis *organic carbon (OC)* melalui TOC,

karbonat, dan C/N, menggunakan metoda CHN (Visser dkk., 2004; Chang dkk., 2005; Sanchez dkk., 2013) dilakukan di *Micropaleontology Laboratory* dan *Stabile Isotope Geochemistry Laboratory, National Sun-Yat Sen University Taiwan, R.O.C.* menggunakan alat *Elemental Analyser* dari *Thermo Scientific* model *Delta V FLASH 2000*.

Pengelompokan sedimen berdasarkan kesamaan karakter yang dianggap homogen menggunakan analisis cluster hierarki ditunjukkan oleh dendrogram sebagai sekala tingkatan jarak kesamaan. Semakin besar kesamaan karakter sedimen akan semakin dekat jarak kesamaan (Bengen, 2000).

Standar peralatan dan bahan

Alat yang digunakan adalah pemercontoh jatuh bebas (*gravity corer*) sepanjang 2 meter untuk mengambil sedimen inti dasar laut. Bahan yang digunakan adalah sedimen inti dasar laut Lereng Kangean (JMF26A) sepanjang 88 cm. Bahan dibelah menjadi dua bagian, satu bagian digunakan pada metode pemindaian dan satu bagian lainnya digunakan untuk metode pencuplikan sistematis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil korelasi Pearson pada Tabel 1 menjelaskan hubungan antar variabel unsur dari XRF, yaitu: K, Ti, Mn, dan Cl. Efek bias karena matrik dari nilai XRF diatasi berdasarkan persamaan berdasarkan Weltje dan Tjallingii (2008), sebagai berikut :

$$\ln \left(\frac{U_1}{U_2} \right) = r * \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad 1$$

dimana :

- r = korelasi antar unsur 1 dan 2,
- P1 = unsur pembilang hasil XRF,
- P2 = unsur penyebut hasil XRF,
- U1 = unsur pembilang rasio,
- U2 = unsur penyebut rasio.

Karakteristik Sampel Inti Sedimen

Hasil deskripsi megaskopis sedimen inti Lereng Kangean menunjukkan satu unit satuan ukuran besar butir yaitu berukuran lempung sampai pasir sangat halus. Sedimen berwarna abu-abu kehijauan gelap (5GY 4/1) sampai abu-abu kehijauan (5GY 5Y) berdasarkan *Munsell Soil Color Charts* (1994). Komposisi jumlah foraminifera dan pecahan cangkang mencapai >15% di bagian atas (komparator PSG, Badan Geologi, KESDM) dengan komposisi ukuran butir pada posisi satuan lempung-lanau (Gambar 2).

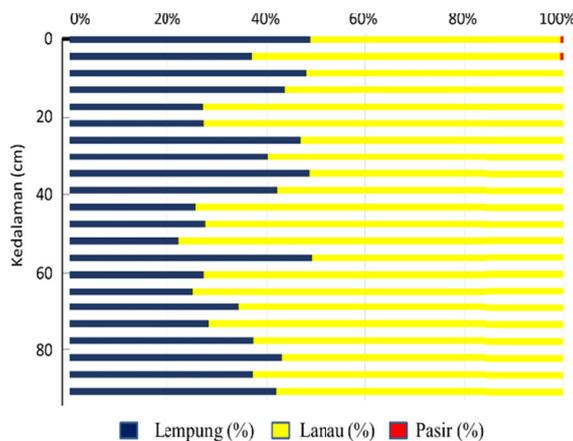
Nilai deskripsi statistik dasar dari semua variabel yang dianalisis dapat dilihat pada Tabel 2. Hasil pengamatan megaskopis dikorelasikan dengan profil variabel sedimen inti (Gambar 3).

Tabel 1. Nilai korelasi antar unsur

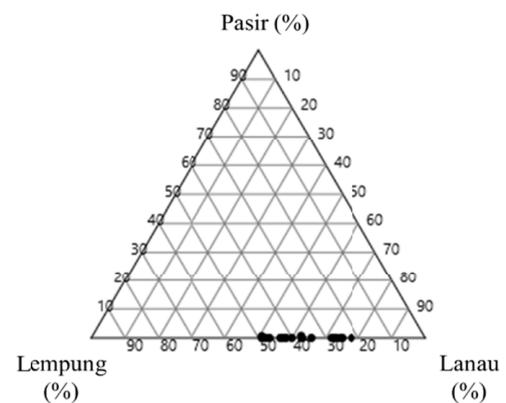
Variabel	K	Ti	Mn	Cl
K	1			
Ti	0.76	1		
Mn	-0.06	-0.25	1	
Cl	0.15	-0.17	0.64	1

Korelasi profil rata-rata butir dan pengamatan megaskopis menunjukkan keseragaman pada kisaran 7,22-7,89φ. Tapi tidak tercermin pada profil BC (Gambar 3) dan hasil pengamatan sayatan oles dari mikroskopis (Gambar 4). Kesimpulan sementara dari hasil pengamatan megaskopis, mikroskopis, rata-rata butiran, dan BC, bahwa sedimen perairan Lereng Kangean berukuran seragam pada satuan lempung-lanau dengan komposisi BC sedikit (<10%).

Hasil interpretasi rata-rata butir dengan BC kemudian dikorelasikan dengan kecerahan sedimen (L*) pada Gambar 3. Profil L* menunjukkan perubahan lingkungan yang relatif kecil pada kisaran 40,14-44,17 (Tabel 2) menguatkan hasil pengamatan megaskopis. Selisih nilai 4 dalam skala terang-gelap (skala nilai 0-100) menunjukkan kecil perubahan warna sedimen walaupun terdapat puncak-puncak nilai. Perubahan terlihat kecil diduga pasokan sumber sedimen dan arus relatif konstan selama pendeposisian. Profil L* menunjukkan gelap-terang diperkirakan karena persentase komposisi material. Pada saat L* gelap mencerminkan dominan komponen asal daratan



(a)



(b)

Gambar 2. Besar butir sedimen inti Lereng Kangean. (a) persentase komposisi butiran dan (b) sebaran ukuran rata-rata besar butir.

Tabel 2. Deskripsi statistik dasar variabel dalam sedimen inti Lereng Kangean

Variabel	Jumlah			Simpangan	
	Data	Minimum	Maksimum	Rata-rata	Baku
Rata-rata butir (ϕ)	22	7,22	7,89	7,57	0,22
BC (%)	22	3,00	10,00	6,27	3,00
L*	88	40,14	44,17	41,98	0,84
MS ($SI \times 10^{-5}$)	88	13,60	116,70	37,94	20,98
Karbonat (%)	22	17,36	50,17	24,84	7,49
TOC (%)	22	0,76	2,01	1,19	0,24
C/N	22	9,11	13,57	10,33	1,18
ln K/Ti	88	0,58	1,09	0,74	0,09
ln Mn/Cl	88	-4,97	-4,24	-4,69	0,13

(Yao dkk., 2012) sedangkan saat L* terang mencerminkan dominan karbonat (Rogerson dkk., 2006).

Hasil korelasi beberapa variabel sebelumnya kemudian dikorelasikan dengan MS. Profil MS menunjukkan pola lima bagian perubahan (Gambar 3). Bagian satu (88-39 cm) menunjukkan pola penurunan bertahap pada rentang nilai 13,60-74,10($SI \times 10^{-5}$). Bagian dua (38-35 cm) mulai terlihat pola kenaikan pada rentang nilai 15,20-109,40($SI \times 10^{-5}$). Bagian tiga (34-12 cm) menunjukkan awal penurunan signifikan sampai 31 cm kemudian menurun secara bertahap pada rentang nilai 65,30-16,10($SI \times 10^{-5}$). Bagian empat (11-8 cm) kembali terlihat pola kenaikan pada rentang nilai 27,70-116,70($SI \times 10^{-5}$). Terakhir, bagian lima (7-0 cm) menunjukkan pola penurunan pada rentang nilai 34,40-93,90($SI \times 10^{-5}$).

Perubahan MS tidak sepenuhnya tercermin dalam L* tetapi kenaikan MS pada bagian dua dan empat tercermin dalam profil rata-rata butir. Korelasi menunjukkan bahwa setiap terjadi peningkatan pasokan dari daratan yang mengandung MS diikuti dengan kenaikan ukuran rata-rata butir. Kondisi ini menunjukkan gambaran bahwa rata-rata butir yang terdeposisi merupakan material batuan dari daratan yang terbawa aliran

(Zhou dkk., 2014). Kondisi perubahan MS dikorelasikan dengan L* menunjukkan pola berlawanan. Pada bagian dua menunjukkan MS naik dan L* juga naik, tetapi ketika MS naik di bagian empat, terlihat L* menunjukkan penurunan. Kondisi ini diperkirakan bahwa kenaikan MS menunjukkan dua karakter sumber yang berbeda artinya sumber yang mempengaruhi kenaikan MS pada bagian dua mengandung komposisi material dari daratan yang mampu menyimpan air pori, tetapi sumber yang mempengaruhi kenaikan MS pada bagian empat diprediksi mengandung komposisi material dari daratan yang kurang mampu menyimpan air pori.

Perbedaan kemampuan sedimen menyimpan air pori diperkirakan karena jenis mineral yang berbeda dalam MS. Fenomena alam yang terjadi pada puncak MS (sekitar kedalaman 35 cm dan 8 cm) perlu dilakukan analisis lanjut mengenai komposisi senyawa mineral dan umur sedimen sehingga dapat diketahui dan dipahami sumber pasokan sedimen yang terekam pada MS. Profil penurunan MS pada bagian tiga dan lima menunjukkan bahwa perairan kembali melakukan pemulihan alami sampai kondisi stabil.

Hasil interpretasi profil variabel sebelumnya (rata-rata butir, BC, L*, dan MS) dikorelasikan dengan material OC asal daratan ditunjukkan oleh

karbonat, TOC dan C/N. Nilai karbonat sekitar 17,36-50,17% (Tabel 2) menunjukkan puncak sekitar kedalaman 24 cm kemudian menurun bertahap mencapai kedalaman 0 cm. Nilai karbonat mulai tercermin dalam BC dan L*. Ketika kedalaman 24 cm mulai menunjukkan penurunan karbonat dan penurunan BC sehingga L* menunjukkan dari terang menjadi gelap karena komposisi karbonat tinggi menjadi rendah. Kondisi perairan menggambarkan perubahan karbon organik OC. Umumnya berasal dari limpasan hujan atau debit sungai yang membawa material OC dari daratan dan OC dari lautan hasil produksi organisme laut (Yun dkk., 2015). Sumber karbonat mulai 24 cm diperkirakan dari daratan (batugamping) dan lautan adanya terumbu karang (Sutisna dkk., 1993; Insafitri, 2010) serta komposisi bagian kasar organisme dari BC (Gambar 3).

Profil TOC menunjukkan fluktuasi dengan nilai tertinggi sekitar kedalaman 64 cm (2,01%) dan terendah sekitar kedalaman 84 cm (0,76%). Hasil korelasi antara karbonat dan TOC menunjukkan kesimpulan sementara bahwa ketika pasokan OC dari daratan mengandung rendah karbonat tetapi TOC mendominasi perairan dan ketika TOC menunjukkan penurunan maka pasokan konsentrasi karbonat dari daratan terekam lebih tinggi dari lautan. Kondisi lingkungan ini kemungkinan berhubungan dengan pengaruh arus melemah (terlindung dari aliran ARLINDO) dan/atau limpasan air hujan atau debit sungai tidak banyak membawa karbonat (gampingan). Profil TOC tinggi tercermin dalam C/N rendah ($C/N < 15$).

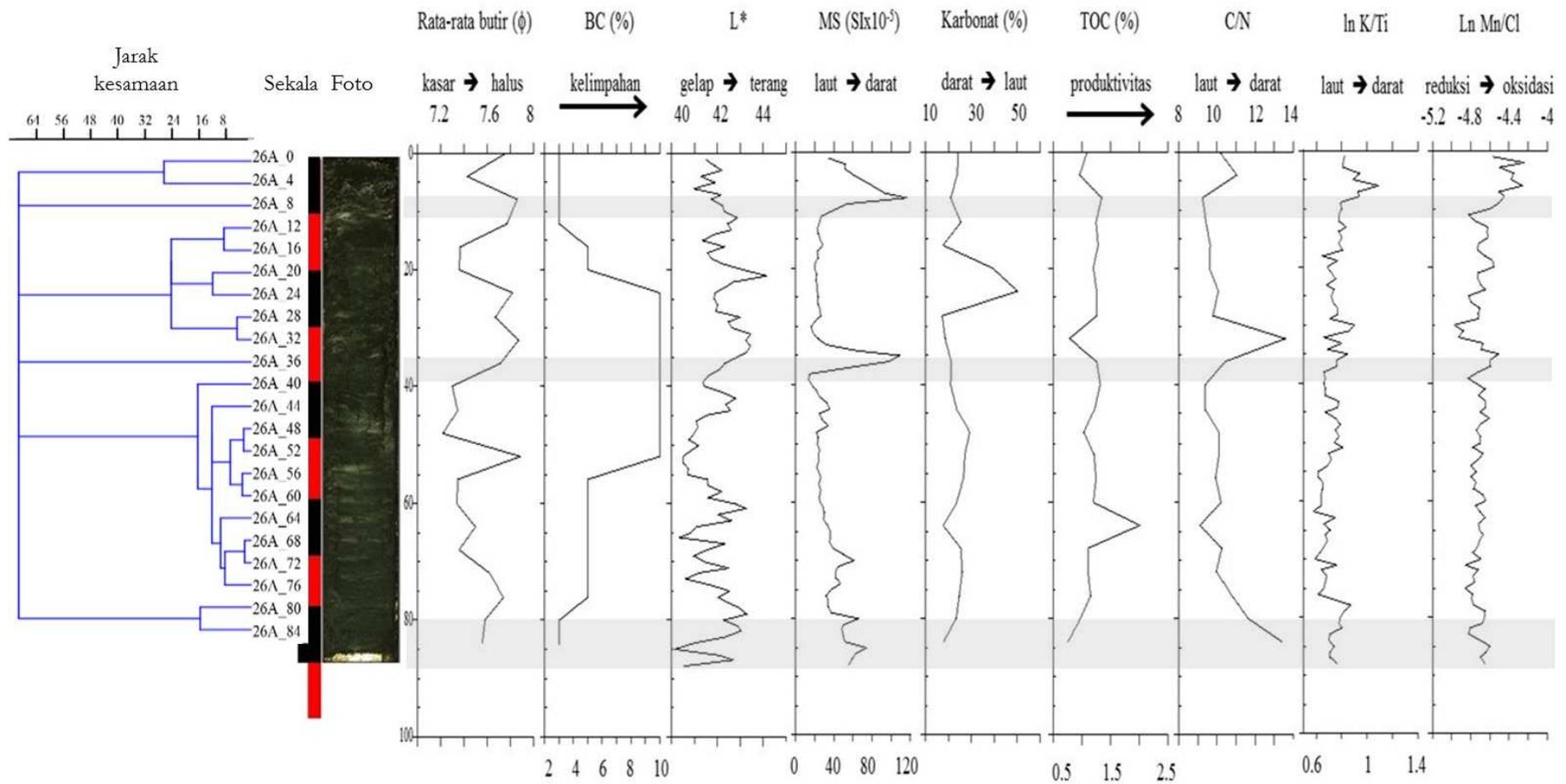
Rasio OC terhadap nitrogen (C/N) mencerminkan sumber material organik secara kualitatif antara sumber darat atau laut (Zhou dkk., 2014). Profil perairan Lereng Kangean menunjukkan $C/N < 15$ artinya komposisi bahan OC cair diperkirakan berasal dari plangton atau bakteri (Visser dkk., 2004). Nilai $C/N < 15$ merupakan pengaruh dari : kondisi lereng yang menerima pasokan tinggi sedimen dari daratan Jawa-Kalimantan (Helfinalis, 2005); pasokan yang berukuran lempung-lanau sehingga mampu mengakumulasi bahan organik (Maslukah, 2013) termasuk N sebagai unsur nutrisi faktor indikator *biogenous*; dan kondisi morfologi dasar laut lereng merupakan bagianinggian sentral (Rahardiawan dkk., 2010) sehingga morfologi melindungi lokasi dari pengaruh percabangan ARLINDO yang berasal dari Selat Makassar dan mendukung N tidak terbawa menjauh dari lokasi.

Korelasi selanjutnya tercermin pada $\ln K/Ti$ (sebagai indikasi pengaruh daratan) dan $\ln Mn/Cl$ (sebagai kontrol dominan kondisi paleoseanografi) (Weltje dan Tjallingii, 2008; Yao dkk., 2012). Nilai $\ln K/Ti$ memiliki nilai rasio berkisar antara 0,58-1,09. Perubahan terjadi dua bagian dengan nilai terbesar sekitar kedalaman 6 cm sebagai batas perubahan dari pola kenaikan kemudian berubah menjadi pola penurunan. Nilai $\ln Mn/Cl$ memiliki nilai berkisar antara -4,97- -4,24. Perubahan lingkungan masa lalu terjadi tiga bagian berdasarkan $\ln Mn/Cl$, yaitu bagian satu (88-35 cm) bernilai -4,86- -4,51 menunjukkan pola relatif stabil, bagian dua (34-30 cm) bernilai -4,67- -4,97 menunjukkan pola penurunan bertahap, dan bagian tiga (29-0 cm) bernilai -4,82- -4,24 dengan pola kenaikan berfluktuasi.

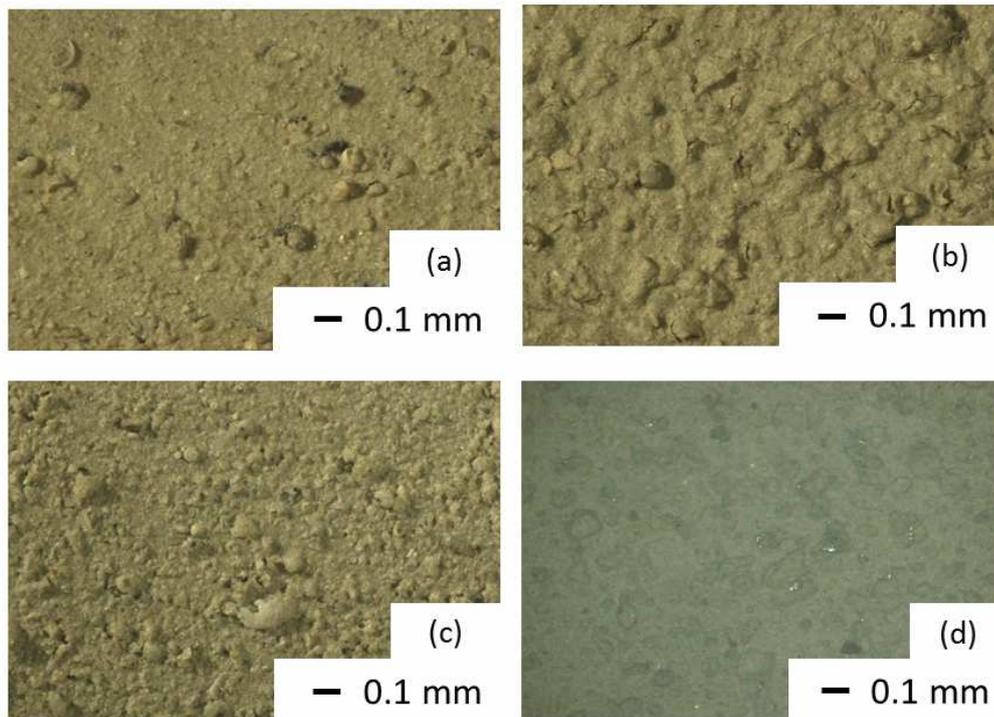
Secara umum hasil deskriptif profil $\ln K/Ti$ dan $\ln Mn/Cl$ menggambarkan peningkatan pasokan komponen dari daratan yang berukuran sedimen lempung-lanau mengandung K. Kandungan K lebih banyak terakumulasi dalam sedimen dibandingkan dengan konsentrasi Ti dalam lempung yang terdeposisi di laut mengalami sedikit penambahan. Komposisi ukuran sedimen halus memberikan kesempatan air pori (Cl) tersimpan dalam sedimen lebih banyak sehingga menunjukkan sedimen dalam kondisi oksidasi. Akibat kondisi ini, maka Mn mengalami peningkatan deposisi karena kenaikan kandungan oksigen. Kondisi ditunjukkan oleh pola kenaikan pada profil $\ln K/Ti$ dan $\ln Mn/Cl$.

Rekonstruksi perubahan lingkungan pengendapan

Interpretasi hasil deskripsi karakter sedimen kemudian dianalisis menggunakan *Principal Component Analysis/PCA*. Penciri utama (F1 28,10%) dalam menentukan karakter sedimen dicirikan oleh pengaruh kuat dari variabel MS, $\ln K/Ti$, dan $\ln Mn/Cl$ yang kuat, sedangkan BC menunjukkan pengaruh yang lemah (Gambar 5) menggambarkan karakter sedimen pengaruh yang kuat dari daratan yang relatif berukuran halus. Sedimen berukuran halus berpengaruh kuat dalam kemampuan redoks sedimen. Sementara penciri kedua (F2 21,37%) dicirikan oleh pengaruh kuat dari variabel C/N yang kuat dan TOC yang lemah, menggambarkan karakter sedimen pengaruh yang kuat dari lautan tetapi TOC lebih dipengaruhi oleh pengaruh yang kuat adanya material asal daratan. Rekonstruksi perubahan lingkungan (Gambar 3) memperlihatkan karakter sedimen Lereng Kangean mengalami satu perubahan besar (88-0



Gambar 3. Rekam sedimen inti Lereng Kangean berdasarkan profil foto digital, rata-rata butir, BC, L*, MS, karbonat, TOC, C/N, ln K/Ti, dan ln Mn/Cl.



Gambar 4. Perubahan komposisi sedimen pada sayatan oles oleh mikroskopis pada sedimen inti Lereng Kangean (JMF26A). (a) kedalaman 88 cm, (b) kedalaman 64 cm, (c) kedalaman 32 cm, dan (d) kedalaman 0 cm.

cm) terdiri dari enam perubahan kecil. Adapun karakteristik masing-masing perubahan adalah sebagai berikut:

- **Pertama sekitar 88-80 cm**

Karakter sedimen sekitar kedalaman 88-80 cm dicirikan oleh ukuran rata-rata butir lanau menjadi lebih halus, peningkatan BC, peningkatan warna sedimen (L^*), penurunan MS, peningkatan karbonat asal lautan, produktivitas meningkat (TOC naik), C/N menurun, ln K/Ti meningkat, dan ln Mn/Cl relatif menurun (Gambar 3). Secara umum, karakter sedimen pada kedalaman ini didominasi pengaruh kuat dari variabel ukuran rata-rata butir dan C/N (Gambar 5).

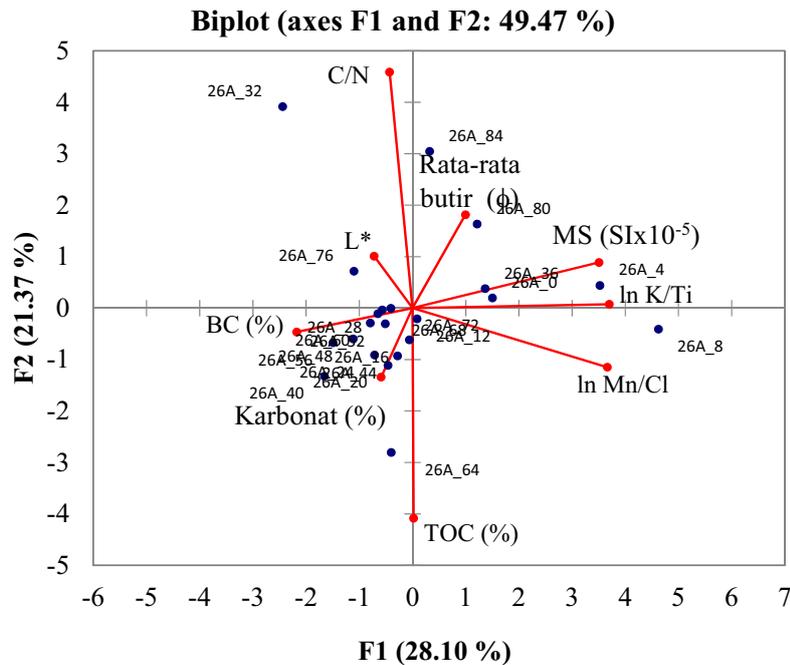
Perubahan ukuran rata-rata butir menjadi lebih halus menandakan kecepatan arus relatif berkurang dan terjadi penurunan kandungan mineral magnetik (MS) dalam sedimen asal daratan. Peningkatan BC menunjukkan pemanfaatan unsur hara oleh organisme mengalami kenaikan, sehingga warna sedimen (L^*) mengalami peningkatan kecerahan karena peningkatan karbonat (Rogerson dkk., 2006). Peningkatan karbonat dan BC selaras dengan peningkatan produktivitas (TOC naik) tercermin pada penurunan C/N. Nilai $C/N < 15$ mencirikan

bahan organik cair dari sumber laut (Visser dkk., 2004; Briones dan Villalobos, 2009; Yu dkk., 2015) karena adanya peningkatan kesuburan perairan yang telah dimanfaatkan organisme. Peningkatan ln K/Ti menandakan peningkatan material dari daratan. Nilai ln Mn/Cl relatif menurun menggambarkan sedimen mengalami reduksi sehingga Mn terdeposisi rendah. Hal ini terjadi karena perubahan ukuran butir menjadi lebih halus (Tabel 2) sehingga kemampuan menyimpan air pori lebih banyak.

- **Kedua sekitar 79-40 cm**

Karakter sedimen sekitar kedalaman 79-40 cm dicirikan oleh rata-rata butir relatif seragam berukuran lempung-lanau, peningkatan BC, fluktuasi warna sedimen (L^*), penurunan MS, karbonat relatif mengalami kenaikan, produktivitas relatif stabil kecuali sesaat sekitar kedalaman 64 menunjukkan kenaikan TOC, C/N relatif mengalami penurunan, ln K/Ti relatif mengalami peningkatan, dan ln Mn/Cl relatif stabil (Gambar 3). Secara umum, karakter sedimen pada kedalaman ini didominasi pengaruh kuat variabel BC dan karbonat (Gambar 5).

Ukuran rata-rata butir relatif seragam kecuali sesaat sekitar kedalaman 52 cm menunjukkan



Gambar 5. Pola biplot hasil rekam sedimen Lereng Kangean

peningkatan material asal daratan yang berukuran halus (In K/Ti). Kondisi ini menggambarkan penambahan material asal daratan terjadi saat kekuatan arus melemah. Peningkatan material asal daratan tidak serta mengandung mineral magnetik (MS) sehingga profil MS menunjukkan penurunan. Fluktuasi warna sedimen (L*) tidak menunjukkan keselarasan antara warna gelap sebagai peningkatan pasokan daratan (Yao dkk., 2012) maupun terang sebagai peningkatan karbonat (Rogerson dkk., 2006).

Profil karbonat relatif mengalami kenaikan kecuali sekitar kedalaman 64 cm mengalami penurunan sesaat. Profil karbonat menunjukkan penurunan tetapi profil BC menunjukkan peningkatan (Gambar 3) menandakan sumber karbonat asal daratan meningkat sehingga berpengaruh terhadap kesuburan perairan. Kesuburan perairan dimanfaatkan organisme sehingga tercermin pada BC mencapai kelimpahan maksimal sebesar 10% (Gambar 3). Produktivitas (TOC) sekitar kedalaman 64 cm menunjukkan kenaikan sesaat, sehingga secara umum sumber karbonat dan karbon organik lebih banyak berasal dari daratan tetapi C/N relatif mengalami menurun. Penurunan C/N menunjukkan kenaikan pengaruh bahan organik dari laut (Briones dan Villalobos, 2009) lebih dominan. Perubahan komposisi material dalam sedimen tidak mempengaruhi kemampuan air pori dalam reaksi redoks sedimen. Interpretasi ini ditunjukkan In Mn/Cl relatif stabil. Secara umum, kondisi perairan

cenderung menerima material dari daratan dan tingkat kesuburan yang tinggi telah dimanfaatkan oleh organisme secara maksimal.

Ketiga sekitar 39-36 cm

Sedimen sekitar kedalaman 39-36 cm menunjukkan karakter sedimen tersendiri (Gambar 20) dicirikan oleh peningkatan rata-rata butir halus, BC stabil (10%), warna L* menunjukkan kenaikan, kenaikan MS, penurunan karbonat, penurunan TOC, kenaikan C/N seiring kenaikan pasokan dari daratan berukuran halus (In K/Ti) berpengaruh terhadap Mn mengalami reduksi (Gambar 3). Secara umum, karakter sedimen pada kedalaman ini didominasi pengaruh kuat variabel MS (Gambar 5).

Kondisi ini menunjukkan perairan mengalami peningkatan material asal daratan dengan kandungan MS yang tinggi. Material asal daratan berasal dari daratan yang masuk ke perairan sebagai indikasi adanya limpasan hujan atau debit sungai yang tinggi. Material asal daratan juga diduga dapat berasal dari material daratan yang sudah lama terendapkan di dasar laut mengalami longoran yang disebabkan guncangan oleh gempa dan/atau tumbukan arus karena lokasi pengambilan sampel berada di lereng Kangean yang merupakan bagianinggian sentral (Rahardiawan dkk., 2010).

Keempat sekitar 35-12 cm

Karakter sedimen sekitar kedalaman 35-12 cm menunjukkan sedimen berukuran halus,

penurunan BC, penurunan warna (L^*) relatif menjadi lebih gelap, kandungan mineral magnetik relatif stabil (MS), perubahan karbonat relatif stabil kecuali terjadi kenaikan signifikan karbonat dari lautan sekitar kedalaman 24 cm, produktivitas relatif stabil tetapi mengalami penurunan sekitar kedalaman 32 cm, selaras dengan kenaikan signifikan pada C/N, ln K/Ti dan ln Mn/Cl relatif terjadi kenaikan (Gambar 3). Secara umum, karakter sedimen sekitar kedalaman ini menunjukkan dominan kuat pengaruh variabel BC dan karbonat (Gambar 5).

Karakter sedimen mencerminkan terjadi peningkatan pengaruh material dari daratan dan penurunan pengaruh lautan tercermin oleh penurunan BC sebagai salah satu variabel yang berpengaruh kuat. Kondisi ini mempengaruhi kandungan karbonat dari lautan sehingga karbonat dari daratan dominan mengalami kenaikan mulai dari kedalaman 24 cm. Kesuburan perairan menurun tercermin pada produktivitas menurun (TOC menurun) dan C/N yang menunjukkan kenaikan.

Kelima sekitar 11-8 cm

Karakter sedimen sekitar kedalaman 11-8 cm (Gambar 3) menunjukkan peningkatan pasokan daratan berukuran halus dengan kandungan mineral magnetik yang tinggi (MS) tercermin pada L^* menjadi lebih gelap dan ln K/Ti mengalami peningkatan. Pengaruh lautan relatif tidak mengalami perubahan tercermin pada variabel BC yang stabil (3%), karbonat, produktivitas dan C/N. Sedimen berukuran halus meningkatkan kemampuan sedimen dalam menyimpan air pori (Libes, 2009) sehingga berpengaruh terhadap kondisi redoks sedimen yang ditunjukkan pada ln Mn/Cl. Secara umum, karakter sedimen pada kedalaman ini dominan menunjukkan pengaruh kuat adanya peningkatan pasokan daratan berukuran lempung dicirikan oleh ln K/Ti (Gambar 5).

Keenam sekitar 7-0 cm

Karakter sedimen bagian atas sekitar kedalaman 7-0 cm memiliki air pori yang mampu merekam salinitas dan oksigen yang relatif lebih tinggi dari kedalaman sebelumnya (Libes, 2009; Hendrizon dkk., 2016). Tinggi oksigen karena pengaruh kontak antara sedimen dengan air laut sehingga salinitas terekam pada Cl dalam air pori berpengaruh dalam reaksi redoks sedimen (Segar, 2012). Material asal daratan yang tinggi terjadi ketika kecepatan aliran arus melemah tercermin

pada ukuran rata-rata butir yang halus terendapkan lebih banyak (Gambar 3). Peningkatan pasokan dari daratan yang tinggi pada wilayah perairan arus lemah mempengaruhi turbiditas dan kehidupan organisme (*biogenous*) menurun. Secara umum, karakter sedimen dicirikan oleh ln K/Ti dan MS (Gambar 5).

Variabel kuat ditunjukkan ln K/Ti dan MS mencerminkan karakter sedimen dominan berasal dari daratan (Yao dkk., 2012) mengalami kenaikan dengan komposisi mineral magnetik (Zhou dkk., 2014) mengalami penurunan (Gambar 3). Material asal daratan yang tinggi di Lereng Kangean diduga berasal dari daratan terdekat yaitu Kangean, atau daratan yang jauh seperti Jawa dan Kalimantan (Helfinalis, 2005). Kondisi lereng merupakan bagian tinggian sentral (Rahardiawan dkk., 2010) sehingga terlindungi dari aliran ARLINDO dan mendukung N tidak terbawa menjauh dari lokasi. Tinggi rendahnya material asal daratan mempengaruhi jenis dan jumlah komposisi sedimen sehingga menentukan kemampuan air pori sedimen melakukan oksidasi terhadap Mn (Libes, 2009).

Secara umum, karakter sedimen Lereng Kangean adalah dicirikan oleh tinggi ln K/Ti, MS, dan ln Mn/Cl, dengan BC yang rendah (Gambar 5). Nilai ln K/Ti sebagai indikator umum komponen asal daratan (Yao dkk., 2012) merupakan penciri utama yang paling kuat. Kemudian didukung oleh kondisi morfologi dasar laut berada di lereng yang merupakan bagian tinggian sentral (Rahardiawan dkk., 2010). Lereng diduga menerima pasokan tinggi sedimen dari daratan terdekat yaitu Kangean, atau daratan jauh, yaitu Jawa dan Kalimantan (Helfinalis, 2005). Kondisi lereng yang merupakan tinggian sentral mempengaruhi lokasi terlindungi dari pengaruh percabangan ARLINDO yang berasal dari Selat Makassar, dan kondisi lereng mendukung perairan memiliki kesuburan tinggi. Kondisi kesuburan perairan tercermin oleh tinggi nilai N pada profil C/N. Tinggi N belum dimanfaatkan maksimal oleh organisme sehingga perairan menunjukkan BC rendah. Tinggi rendahnya pasokan dari daratan mempengaruhi komposisi sedimen yang terendapkan. Komposisi MS dengan jenis dan jumlah berbeda berpengaruh terhadap kemampuan sedimen menyimpan Cl sebagai indikasi salinitas dalam air pori (Libes, 2009). Kondisi ini menentukan kemampuan sedimen melakukan oksidasi terhadap Mn. Nilai ln Mn/Cl sebagai kontrol dominan kondisi paleoseanografi (Yao dkk., 2012).

KESIMPULAN

Karakter sedimen inti Lereng Kangean (JMF26A) menunjukkan pengaruh daratan yang kuat dicirikan oleh variabel $\ln K/Ti$, MS , dan $\ln Mn/Cl$ yang tinggi, dengan BC yang rendah. Hal ini berdasarkan hasil analisis metoda pengamatan megaskopis, pemindaian dan pencuplikan sistematis melalui pengelompokan perubahan lingkungan dari dendrogram berdasarkan jarak kesamaan karakter sedimen. Hasil pengelompokan memperlihatkan proses sedimentasi yang homogen mengalami satu perubahan besar (88-0 cm) yang terdiri dari enam perubahan kecil, yaitu perubahan pertama (88-80 cm), perubahan dua (79-40 cm), perubahan ketiga (39-36 cm), perubahan empat (35-12 cm), perubahan lima (11-8 cm), dan perubahan lima (7-0 cm). Indikasi ini terjadi karena kesamaan karakteristik sedimen yang relatif homogen, kondisi lereng mendukung perairan memiliki kesuburan tinggi karena Lereng Kangean bagian Paparan Sunda yang merupakan tinggian sentral sehingga morfologi mampu melindungi sedimen dari pengaruh aliran percabangan ARLINDO dari Selat Makassar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim survei "Penelitian Lingkungan Geologi Kelautan Perairan Laut Jawa, Laut Sulawesi Selatan, hingga Laut Sawu dengan Menggunakan Kapal Riset Geomarin 3". Terima kasih juga diungkapkan kepada jajaran dosen dan staf *Micropaleontology Laboratory* dan *Stabile Isotope Geochemistry Laboratory, NSYSU Taiwan, R.O.C.* dan *Oceanography Laboratory, National Taiwan University, R.O.C.* Selain itu, penulis sangat berterima kasih kepada para Dosen dan rekan-rekan di P3GL serta teman-teman IKL-IPB, atas bantuan dan dukungannya hingga terwujudnya karya tulis ini.

DAFTAR ACUAN

- Bengen, D.G., 2000. *Teknik Pengambilan Contoh dan Analisis Data Biofisik Sumberdaya Pesisir*. PKSPL-IPB. Bogor (ID): IPB Press.
- Briones, E. E., dan Villalobos, F. J. G., 2009. Distribution of total organic carbon and total nitrogen in deep-sea sediments from the southwestern Gulf of Mexico. *Buletin De La Sociedad Geologica Mexicana*. 61(1):73-86.
- Bruland, K. W., dan Lohan, M. C., 2004. Controls of trace metals in seawater. In: Holland H.D. and K.K. Turekian (ed.). *The Oceans and Marine Geochemistry*. Elsevier. 6(2):23-48.
- Chang, Y.P., Wu, S.M., Wei, K.Y., Murayama, M., Kawahata, H., Chen, M.T., 2005. Foraminiferal Oxygen Isotope Stratigraphy and High-Resolution Organic Carbon, Carbonate Records from the Okinawa Trough (IMAGES MD012404 and ODP Site 1202). *Terrestrial Atmospheric And Oceanic Sciences*. 16(1):57-73.
- GEBCO. 2014. *Bathimetri Indonesia*. GEBCO_2014 GRID. [diunduh pada 10 Pebruari 2016. tersedia pada <http://gebcoset.org>]
- Gordon, A.L., Giulivi C.F., dan Ilahude A.G., 2003. Deep Topographic Barriers Within The Indonesian Seas. *Deep-Sea Research*. Part II. 50:2205-2228.
- Gordon, A.L. 2005. Oceanography of the Indonesian Seas and their Throughflow. *Oceanography*. 18:14-27.
- Helfinalis, 2005. Suspensi dan Endapan Sedimen di Perairan Laut Jawa. *Makara*. Sains. 9 (1):34-40.
- Insafitri, 2010. Prosentase Penutupan Karang di Pulau Kangean-Sumeneh. *Jurnal Kelautan..* 3(2):112-116.
- Libes, S.M., 2009. *Introduction to Marine Biogeochemistry*. Second Edition. ISBN: 978-0-12-088530-5. Elsevier. South Carolina.UK.
- Manual. *Multi-Sensor Core Logger (MSCL)*. version 17-02-14. Geotek Ltd.
- Maslukah, L., 2013. Hubungan antara Konsentrasi Logam Berat Pb, Cd, Cu, Zn dengan Bahan Organik dan Ukuran Butir dalam Sedimen di Estuari Banjir Kanal Barat, Semarang. *Buletin Oseanografi Marina*. 2:55-62.
- Pinet, P.R., 2014. Invitation to Oceanography. Chapter 4. Marine Sedimentation. Fifth Edition. *Jones and Bartlett Publication*. 92-133.
- Qiao, S., Shi, X., Saito, Y., Li, X., Yu, Y., Bai, Y., Liu, Y., Wang, K. dan Yang, G., 2011. Sedimentary Records of Natural and Artificial Huanghe (Yellow River) Channel Shifts During The Holocene in The Southern Bohai Sea. *Continental Shelf Research*. 31:1336-1342. doi:10.1016/j.csr.2011.05.007.

- Radjawane, I.M., dan Hadipoetranto, P.P., 2014. Karakteristik Massa Air di Percabangan Arus Lintas Indonesia Perairan Sangihe Talaud Menggunakan Data Index SATAL 2010. *Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*. 6(2):525-536.
- Rahardiawan, R., Kurnio, H., Wahib, A., Naibaho, T., Novi, S., Surahman, M., Yulinar, Wildan, A., Rohendi, E., Ibrahim, A., 2010. Pemetaan Geologi dan Geofisika Kelautan Bersistem Skala 1:1.000.000, LP. 1909, 1910, 2009 dan 2010 Perairan Spermonde dan Selatan Selat Makassar (Sulawesi Selatan). Laporan Kegiatan Penelitian. No. 026/LAP/P2K/P3GL/XII/2010 Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan. Badan Penelitian dan Pengembangan Energi dan Sumber Daya Mineral. Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral. Tidak dipublikasikan
- Rifardi. 2012. *Ekologi Sedimen Laut Modern..* Edisi Revisi. Penerbit UR PRESS Pekanbaru.
- Rogerson, M., Weaver, P.E., Rohling, E.J., Lourens, L.J., Murray, J.W., dan Hayes, A., 2006. Colour logging as a tool in high-resolution palaeoceanography. *In: Rothwell RG. (ed.) New Techniques in Sediment Core Analysis*. Geological Society. London. Special Publications. 267:99-112.
- Sanchez, A., Ortiz, B. E. L., Garcia, S. A., dan Balart, E., 2013. Distribution and composition of organic matter in sediments of the oxygen minimum zone of the Northeastern Mexican Pacific: paleoceanographic implications. *Journal of Iberian Geology*. 39(1):111-120. 1886-7995.
- Sathiamurthy, E., dan Voris, H.K., 2006. Maps of Holocene Sea Level Transgression and Submerged Lakes on the Sunda Shelf. *Natural History Journal*. Chulalongkorn University. 2:1-44.
- Segar, D.A. 2012. *Introduction to Ocean Sciences*. Third Edition. First electronic edition ver 3.2.
- Susanto, R.D, Ffield, A, Gordon A.L, dan Adi T.R. 2012. Variability of Indonesian Throughflow within Makassar Strait. 2004-2009. *Geophysical Research*. 117.C09013: 1-16. doi:10.1029/2012JC008096.
- Sutisna, K., Samodra, H, dan Koswara. A 1993. *Peta Geologi Lembar Kangean dan Sapulidi, Jawa*. 1708-4, 1709-3, 1808-4, 1809-1, 1708-5. Sekala 1:100.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Visser, K., Thunell, R. , dan Goni, M. A. 2004. Glacial–Interglacial Organic Carbon Record From the Makassar Strait, Indonesia: Implications For Regional Changes In Continental Vegetation. Elsevier. *Quaternary Science Reviews*. 23:17–27.
- Weltje, G.J., dan Tjallingii, R., 2008. Calibration Of XRF Core Scanners for Quantitative Geochemical Logging of Sediment Cores: Theory And Application. *Earth and Planetary Science Letters*. Elsevier. 274:423–438.
- Yao, Z., Liu, Y., Shi, X., dan Suk, B.C., 2012. Paleoenvironmental Changes in The East/ Japan Sea During The Last 48 ka : Indications From High Resolution X-Ray Fluorescence Core Scanning. *Quaternary Science*. ISSN 0267-8179. doi: 10.1002/jqs.2583. 27(9):932-940.
- Yun, P.S., Ariffin, J., Siang, H. Y. dan Tahir, N. M., 2015. Influence of Monsoon on the Distribution of Organic Carbon in Inner Continental Shelf Core Sediments, South China Sea, Malaysia. *Sains Malaysiana*. 44(7):941–945.
- Zhou, X., Sun, L., Huang, W., Liu, Y., Jia, N., dan Cheng, W., 2014. Relationship Between Magnetic Susceptibility and Grain Size of Sediments in The China Seas And Its Implications. *Continental Shelf Research*. 72:131–137.
- Zuraida, R., Budiono, K., Prasetyo, F.B., Firdaus, Y., Sahudin, Latuputty, G., Atmadipoera, A.S., Risko, Panjaitan, D., Permanawati, Y., 2015. *Penelitian Lingkungan Geologi Perairan Laut Jawa. Laut Sulawesi Selatan Hingga Sawu Dengan Menggunakan Kapal Riset Geomarin 3*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan. Badan Penelitian dan Pengembangan Energi dan Sumber Daya Mineral. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Tidak dipublikasikan
- Zuraida, R., Troa, R.A., Hendrizan, M., Triarso, E., Gustiantini, L., Nurdin, N., Hantoro, W.S., dan Liu, S., 2015. Penentuan Siklus Glasial – Interglasial Terakhir Pada Sedimen Dasar Laut Kawasan Lepas Pantai Palabuhanratu. *Jurnal Segara*. 11(2):93-101.

