

Karakteristik Ukuran Butir dan Proses Deposisi pada Inti Sedimen Perairan Laut Maluku, Indonesia

Mohammad Agung Nugraha^{1,2*}, Tri Prartono¹, Agus Saleh Atmadipoera¹,
Rina Zuraida³, Yuli Naulita¹, Ali Arman Lubis⁴, Afdal⁵

¹Program Studi Ilmu Kelautan, Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB University

Jl. Agatis, Gedung Marine Center Lt.3, Kampus IPB Dramaga, Bogor, 16680, Indonesia

²Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Pertanian, Perikanan, dan Kelautan, Universitas Bangka Belitung Kampus Terpadu – UBB, Bangka, Kepulauan Bangka Belitung, 33172, Indonesia

³Pusat Riset Iklim dan Atmosfer, Badan Riset dan Inovasi Nasional

Kawasan Sains dan Teknologi Prof. Dr. Samaun Samadikun, Jl. Cisitua Sangkuriang, Bandung, Jawa Barat 40135, Indonesia

⁴Pusat Riset Teknologi Proses Radiasi, Badan Riset dan Inovasi Nasional

Gedung 720, KST B.J. Habibie Serpong, Jl. Puspipetek, Muncul, Kec.Setu, Kota Tangerang Selatan, Banten 15314, Indonesia

⁵Pusat Riset Oseanologi, Badan Riset dan Inovasi Nasional

Kawasan Sains Aprilani Soegiarto, Jl. Pasir Putih 1, Ancol Timur, Jakarta 14430, Indonesia

Email: agung-nugraha@ubb.ac.id

Abstract

Grain Size Characteristics and Deposition Processes in Sediment Cores from the Maluku Sea, Indonesia

Sediment grain size characteristics are important variables for understanding depositional processes in the Maluku Sea. However, research has been limited by a lack of adequate vertical granulometric data. This study reconstructs the dynamics of the depositional environment in the Maluku Sea based on vertical variations in sediment grain size. Core samples 29BC and 57BC were collected at depths of 2324 m and 2286 m, respectively. Grain size analysis was performed using a laser diffraction particle size analyzer (Mastersizer 2000), with statistical parameters calculated using Gradistat software version 8.0. The results show that both sediment cores are dominated by coarse to medium silt fractions with sandy mud textures and unimodal distribution patterns. The sediment transport mechanism based on the C-M diagram is dominated by uniform suspension in a semi-enclosed environment with relatively low energy. However, the vertical profiles of the two locations record different hydrodynamic stability. The 29BC sediment core is more dynamic and fluctuating (mean 5,534-6,071 ϕ , sorting 1,439-1,678 ϕ , skewness symmetrical to coarsely skewed) with a trend of increasing grain size towards the top, recording a temporal strengthening of hydrodynamic energy related to the intensity of active upwelling during the El Niño phase. In contrast, the 57BC site shows homogeneous and stable vertical characteristics (mean 5,747-5,935 ϕ , sorting 1,403-1,537 ϕ , consistently symmetrical skewness), reflecting a relatively low-energy depositional environment that was constant outside the reach of strong current fluctuations (outside the upwelling area), and influenced by heterogeneous terrestrial material supply due to its geographical position closer to the mainland.

Keywords: Grain size; sediment core, depositional environment, upwelling, uniform suspension, Maluku Sea

Abstrak

Karakteristik ukuran butir sedimen merupakan variabel sedimentologi penting untuk memahami proses pengendapan di Laut Maluku. Namun, penelitian mengenai hal ini belum didukung oleh ketersediaan data granulometri vertikal yang memadai. Penelitian ini bertujuan untuk merekonstruksi dinamika lingkungan pengendapan di Laut Maluku berdasarkan variasi vertikal karakteristik ukuran butir sedimen. Sampel inti sedimen (29BC dan 57BC) diambil pada kedalaman 2324 m dan 2286 m. Analisis ukuran butir dilakukan dengan menggunakan instrumen *laser diffraction particle size analyzer* (Mastersizer 2000), dengan parameter statistik seperti nilai rata-rata, sortasi, kemencengan, dan kurtosis dihitung dengan perangkat lunak Gradistat versi 8.0. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua inti sedimen didominasi oleh fraksi lanau kasar hingga lanau sedang dengan tekstur lumpur berpasir dan pola distribusi unimodal. Mekanisme transportasi sedimen berdasarkan diagram C-M didominasi oleh suspensi seragam pada lingkungan semi tertutup berenergi relatif rendah. Meskipun demikian, profil vertikal kedua lokasi merekam stabilitas hidrodinamika yang berbeda. Inti sedimen 29BC lebih dinamis dan fluktuatif (rata-rata 5,534-6,071 ϕ , sortasi 1,439-1,678 ϕ , kemencengan simetris hingga condong berbutir kasar) dengan tren peningkatan ukuran butir ke lapisan atas, merekam penguatan energi hidrodinamika secara temporal yang berkaitan dengan intensitas *upwelling* aktif selama fase El Niño. Sebaliknya, lokasi 57BC menunjukkan karakteristik vertikal yang homogen dan stabil (rata-rata 5,747-5,935 ϕ , sortasi

1,403-1,537 ϕ , kemencengan konsisten simetris), merefleksikan kondisi lingkungan pengendapan berenergi relatif rendah yang konstan di luar jangkauan fluktuasi arus kuat (di luar area *upwelling*), serta dipengaruhi suplai material terestrial heterogen karena posisi geografisnya yang lebih dekat dengan daratan.

Kata kunci: Ukuran butir, inti sedimen, lingkungan pengendapan, *upwelling*, suspensi seragam, Laut Maluku

PENDAHULUAN

Analisis karakteristik ukuran butir merupakan instrumen fundamental dalam studi sedimentologi laut untuk memahami dinamika lingkungan pengendapan sedimen klastik (Badawi *et al.*, 2022; Surjono & Amijaya, 2017). Variasi spasial dan temporal pada ukuran butir sedimen merupakan proses dinamika sedimen yang komprehensif di lingkungan perairan (Astriandhita *et al.*, 2017; Liang *et al.*, 2020; Olatinsu *et al.*, 2025; Selvaraj *et al.*, 2017). Sedimen yang diendapkan di lingkungan yang berbeda dicirikan oleh parameter ukuran butir yang unik. Parameter ukuran butir sedimen dan pola perubahannya merupakan respon terintegrasi dari pola transportasi sedimen, kondisi hidrodinamika, dan perubahan paleoklimat regional (Ge *et al.*, 2024) (Kasim *et al.*, 2023). Penelitian terkait analisis granulometri telah dilakukan secara luas di berbagai negara baik perairan sungai, pesisir dan laut seperti Sungai Tigris-Irak (Jassim & Abbas, 2024), Pantai Waikelo, Sumba-Indonesia (Nugroho & Putra, 2018), wilayah pesisir Mediterania Timur (Ghsoub *et al.*, 2020), Teluk Laizhou bagian barat, Laut Bohai-Cina (Gao *et al.*, 2020), Laut Merah-Mesir (Badawi *et al.*, 2022), dan Laut Baltik (Leszczyńska *et al.*, 2024).

Laut Maluku memiliki posisi strategis dalam sistem oseanografi global karena menjadi lintasan utama Arus Lintas Indonesia (Arlindo) yang mentranspor massa air dari Samudra Pasifik ke Samudra Hindia. Dinamika arus ini, bersama dengan variasi monsun, berperan penting dalam memicu *upwelling* yang mendistribusikan material sedimen di wilayah tersebut (Fitriyan *et al.*, 2023; Wirasatriya *et al.*, 2021). Laut Maluku terletak di bagian timur Pulau Sulawesi dan berbatasan dengan Kepulauan Maluku Utara di sebelah barat serta memiliki kedalaman hingga 4500 m (Atmadipoera *et al.*, 2018). Karakteristik geologi Laut Maluku dicirikan oleh kompleksitas komposisi litologi yang meliputi batuan vulkanik, sedimen, serta batuan dasar kerak samudra berupa ofiolit dan batuan ultramafik (Setyanta & Setiadi, 2011). Eksistensi formasi geologi tersebut berperan sebagai sumber material alami yang mengalami proses transportasi dari lingkungan pesisir menuju perairan dalam Laut Maluku. Selain masukan material litogenik, kualitas lingkungan di wilayah Laut Maluku juga dipengaruhi oleh masukan material antropogenik yang berpotensi memberikan tekanan ekologis terhadap ekosistem perairan Laut Maluku (Suteja *et al.*, 2025). Studi ukuran butir di perairan Indonesia terbatas pada indentifikasi distribusi sedimen (Nugroho & Basit, 2014) dan belum banyak studi terkait proses transportasi dan pengendapan berdasarkan distribusi ukuran butir yang terekam dalam sedimen (Nugroho & Putra, 2018), khususnya di perairan laut dalam. Studi ukuran butir pada inti sedimen Laut Maluku masih terbatas dengan pendekatan rasio Zr/Rb untuk mendeteksi variasi ukuran butir secara tidak langsung, tanpa analisis granulometri (Wiguna *et al.*, 2025). Keterbatasan data mengenai histori pengendapan secara temporal di wilayah ini menjadi dasar perlunya dilakukan penelitian ini.

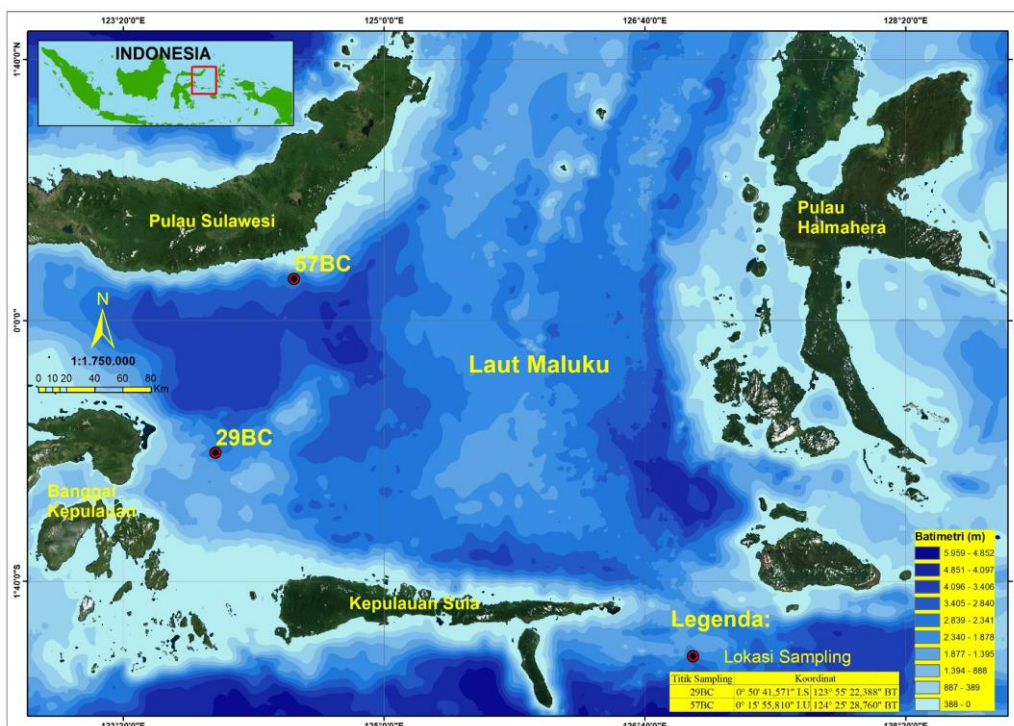
Sedimen permukaan cenderung bersifat representatif terhadap kondisi lingkungan pengendapan terkini, profil vertikal dari inti sedimen memungkinkan dilakukannya rekonstruksi histori pengendapan secara kronologis. Variasi ukuran butir dalam profil vertikal berfungsi sebagai arsip alami yang merekam fluktuasi energi hidrodinamika dan perubahan lingkungan dari waktu ke waktu. Analisis vertikal ini menjadi sangat krusial di wilayah dinamis seperti perairan Laut Maluku, perubahan suplai material terestrial dan intensitas arus laut terekam secara sistematis dalam lapisan-lapisan sedimen. Parameter statistik seperti rata-rata ukuran butir, sortasi, kemencengan, dan kurtosis secara kolektif dapat mencerminkan tingkat energi hidrodinamika yang mengontrol proses pelapukan, erosi, transportasi, dan sedimentasi di suatu wilayah perairan. Penggunaan analisis ukuran butir sedimen dan plot diagram C-M pada setiap lapisan vertikal inti sedimen, memungkinkan identifikasi yang lebih akurat mengenai evolusi mekanisme transportasi sedimen

(suspensi seragam, suspensi bergradasi, maupun mekanisme traksi) dan proses deposisi. Penelitian ini bertujuan untuk merekonstruksi dinamika lingkungan pengendapan di Laut Maluku berdasarkan variasi vertikal karakteristik ukuran butir sedimen. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman mendalam mengenai stabilitas lingkungan pengendapan dan dinamika sedimentasi jangka panjang di salah satu wilayah perairan paling dinamis di Indonesia.

MATERI DAN METODE

Sampel inti sedimen perairan Laut Maluku (Gambar 1) diambil pada kegiatan Banggai Upwelling Dynamics and Ecosystem Experiment (BUDEE) Cruise 2022 (4-18 September 2022) dengan menggunakan kapal riset Baruna Jaya VIII. Pengumpulan contoh sedimen dilakukan di 2 titik yaitu titik 29BC (pusat upwelling) dan 57BC (luar area upwelling) yang memiliki kedalaman 2324 m dan 2286 m. Titik pengambilan contoh sedimen dilihat posisinya (lintang dan bujur) dengan menggunakan alat *Global Positioning System* (GPS). Contoh inti sedimen dikoleksi dengan menggunakan alat *box core*. Selanjutnya, sampel inti sedimen Laut Maluku dilakukan *sub core* dan disimpan pada suhu -4°C di laboratorium hingga analisis lebih lanjut. Sampel *sub core* dilakukan sub sampel dengan resolusi 1 cm, kemudian dimasukkan dalam plastik klip polietilen. Sedimen dikeringkan dengan oven pada suhu 60°C (± 48 jam), dihaluskan dengan mortar dan dimasukkan dalam plastik klip (Bastami *et al.*, 2017; Elias *et al.*, 2018; Kang *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2015).

Sampel sedimen basah ($\pm 0,5$ gr) yang akan dianalisis dilakukan preparasi dengan tahapan (Zhou *et al.*, 2014): penambahan larutan 10 mL HCl 10% untuk menghilangkan karbonat, penambahan larutan 10 mL H₂O₂ 30% untuk menghilangkan material organik, kemudian sampel diaduk dan direndam semalam (± 12 jam). Selanjutnya, larutan HCL dan H₂O₂ dibuang dan sampel ditambahkan akuades (± 50 mL) untuk membilas sampel agar bebas dari HCL dan H₂O₂. Selanjutnya, sampel dianalisis dengan instrumen *laser diffraction particle size analyzer* (Mastersizer 2000) yang memberikan volume setiap fraksi ukuran butir. Instrumen tersebut dapat mengukur material dari ukuran 0,02 μ m - 2000 μ m (Putra & Nugroho, 2017).



Gambar 1. Peta lokasi sampling inti sedimen di perairan Laut Maluku

Tabel 1. Formula perhitungan parameter ukuran butir (Folk & Ward, 1957)

Rata-rata (M_z)	Sortasi (σ_I)	Kemencengan (Sk_I)	Kurtosis (K_G)
$M_z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$	$\sigma_I = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6,6}$	$Sk_I = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$	$K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2,44(\phi_{75} - \phi_{25})}$
Sortasi (σ_I)	Kemencengan (Sk_I)	Kurtosis (K_G)	
<0,35 (tersortir sangat baik);	0,3 hingga 1,0 (menceng sangat halus);	<0,67 (sangat platikurtik);	
0,35-0,50 (tersortir baik);	0,1 hingga 0,3 (menceng halus);	0,67-0,90 (platikurtik);	
0,50-0,70 (tersortir baik-sedang);	0,1 hingga -0,1 (simetris);	0,90-1,11 (mesokurtik);	
0,70-1,00 (tersortir sedang);	-0,1 hingga -0,3 (menceng kasar);	1,11-1,50 (leptokurtik);	
1,00-2,00 (tersortir buruk);	-0,3 hingga -1,0 (menceng sangat kasar);	1,50-3,00 (sangat leptokurtik);	
2,00-4,00 (tersortir sangat buruk);		>3,00 (leptokurtik ekstrem).	
> 4,00 (tersortir buruk ekstrem).			

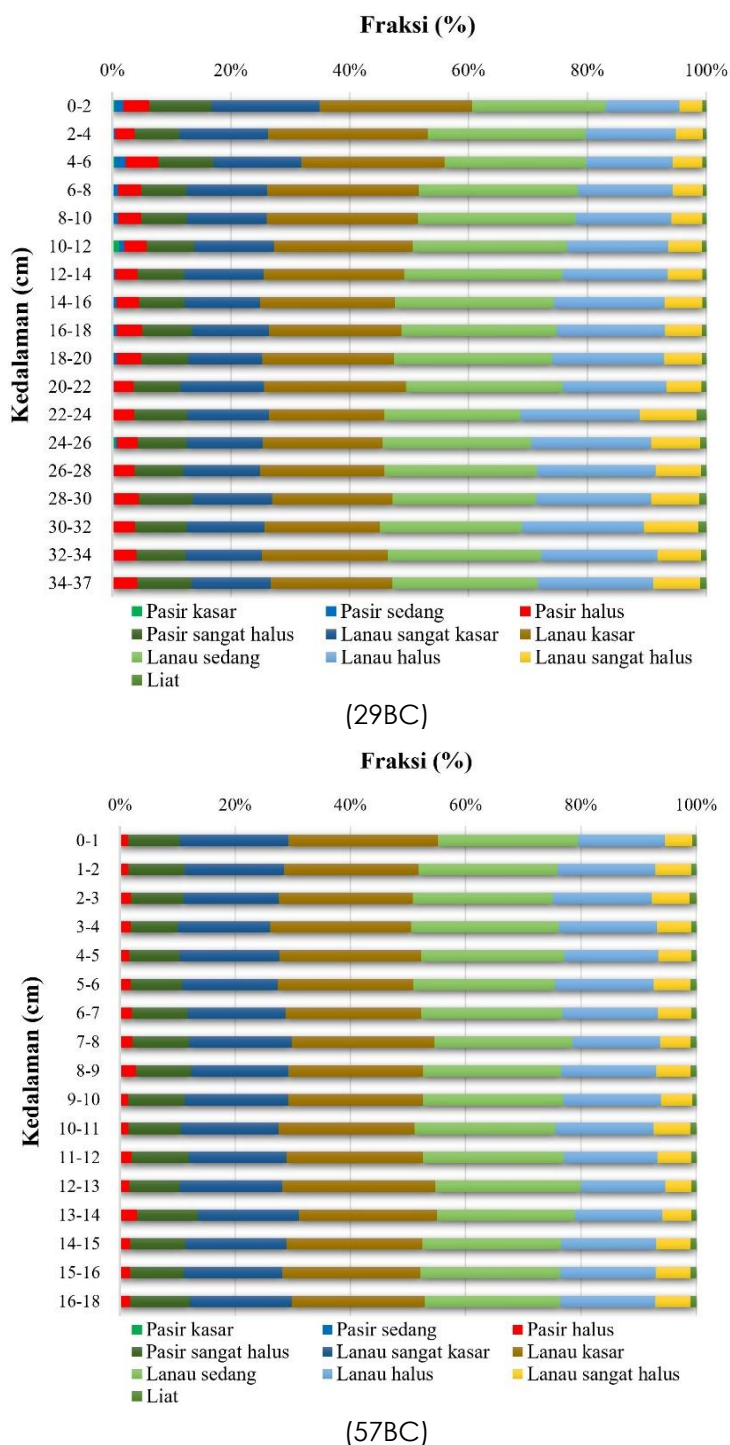
Metode matematis (Tabel 1) yang digunakan dalam menginterpretasi karakteristik ukuran butir yaitu nilai rata-rata (*mean*), sortasi, kemencengan (*skewness*), dan kurtosis (Folk & Ward, 1957) dan dihitung dengan perangkat lunak Gradistat versi 8.0 (Blott & Pye, 2001). Parameter ukuran butir dihitung secara logaritmik dalam unit ϕ ($\phi = -\log_2 d$, d: ukuran butir (mm)) (Ghsoub *et al.*, 2020; Mohtar *et al.*, 2017). Nilai ϕ_{16} pada perhitungan parameter ukuran butir adalah nilai persentil ke 16 dari distribusi besar butir, dan seterusnya untuk ϕ_{50} , ϕ_{84} serta nilai persentil yang lain (Putra & Nugroho, 2017). Klasifikasi besar butir digunakan dalam menentukan jenis atau tipe sedimen (Blott & Pye, 2001).

Diagram C-M merupakan metode yang menyajikan hasil dari analisis ukuran butir sedimen yang memplotkan C nilai persentil pertama (D90) yang lebih kasar terhadap M median (D50) pada skala logaritmik (Nugroho & Putra, 2019; Passega, 1957, 1964; Rahman *et al.*, 2022). Nilai C mewakili energi maksimum (energi awal) ketika hidrodinamika mulai mentranspor sedimen, sedangkan M mewakili energi rata-rata dari gaya hidrodinamika (Gao *et al.*, 2020). Nilai C dan M tersebut dapat disajikan dalam satuan milimeter (mm), mikrometer (μm) maupun phi (ϕ) dan dalam penelitian ini menggunakan satuan μm . Pola diagram C-M dapat dibagi oleh titik N, O, P, Q, R, S menjadi segmen-segmen yang masing-masing bersesuaian dengan mekanisme sedimentasi tertentu (Passega, 1964; Passega & Byramjee, 1969). Selanjutnya, batas dasar dalam diagram C-M dibagi tiga (Passega, 1964) yaitu Cr (*C-rolling*), Cs (*C-graded suspension*), dan Cu (*C-uniform suspension*). Cr dari C membentuk batas ukuran bawah butiran melalui proses menggeling. Nilai Cs dari C pada titik Q, dengan ukuran butir terbesar yang ditranspor sebagai suspensi bergradasi. Nilai Cu dari C pada titik R, secara umum merupakan ukuran butir terbesar yang ditranspor sebagai suspensi seragam. Diagram C-M dapat digunakan dalam studi endapan fluvial, pesisir, dan laut sehingga dapat melihat histori transportasi dan pengendapan pada lingkungan yang berbeda (Mycielska-DowgiatŁo & Ludwikowska-Kedzia, 2011).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sampel sedimen yang diperoleh di Laut Maluku (inti sedimen 29BC dan 57BC) terdiri atas ukuran butir yang bervariasi, baik fraksi pasir kasar, pasir sedang, pasir halus, pasir sangat halus, lanau kasar, lanau sedang, lanau halus, lanau sangat halus, dan liat (Gambar 2). Analisis ukuran butir pada inti sedimen 29BC dan 57BC menunjukkan kemiripan karakteristik fisik dengan kisaran diameter butir berkisar antara 0,97-710 μm dan 0,97-355 μm serta pada setiap lapisan kedalaman diklasifikasikan dalam kelompok tekstur lumpur berpasir. Komposisi ukuran butir pada kedua lokasi terlihat didominasi fraksi lanau (dari lanau sangat halus hingga lanau kasar) dengan persentase rata-rata 86,09% (29BC) dan 87,80% (57BC), diikuti oleh fraksi pasir (pasir sangat halus-pasir kasar) 13,06% (29BC) dan 11,31% (57BC). Untuk fraksi liat memiliki persentase rata-rata terendah, yaitu 0,85% (29BC) dan 0,89% (57BC). Selanjutnya, pola distribusi ukuran butir unimodal ditemukan pada seluruh lapisan kedalaman sampel inti sedimen 29BC (Tabel 2) dan 57BC (Tabel 3).

Karakteristik tersebut juga ditemukan di wilayah Laut Cina Selatan bagian barat laut (Ge *et al.*, 2024). Pola distribusi unimodal khususnya pada fraksi halus, menunjukkan proses akumulasi material yang berlangsung secara terus menerus dalam jangka waktu lama di bawah pengaruh hidrodinamika dasar laut yang tenang dan relatif stabil (Ovsepyan *et al.*, 2025). Sebaliknya, pola bimodal dan polimodal (multipuncak) umumnya dapat ditemukan pada perairan dangkal (Santos *et al.*, 2025; Suryani *et al.*, 2025) dan menunjukkan adanya percampuran mekanisme transportasi (seperti traksi, saltasi, dan suspensi) yang umumnya terjadi akibat fluktuasi energi di perairan dangkal (Ge *et al.*, 2024).



Gambar 2. Komposisi ukuran butir sedimen di perairan Laut Maluku

Nilai rata-rata ukuran butir dapat menjadi indikator penting dalam mengestimasi kondisi energi hidrodinamika saat pengendapan berlangsung. Kehadiran butiran sedimen yang lebih halus menunjukkan kondisi lingkungan pengendapan dengan energi rendah, sedangkan dominannya butiran sedimen yang lebih kasar menunjukkan energi lingkungan yang tinggi (Ghsoub *et al.*, 2020; Rahman *et al.*, 2022). Secara umum, kedua inti sedimen didominasi oleh fraksi lanau kasar, namun memperlihatkan profil vertikal yang berbeda. Inti sedimen 29BC memiliki nilai rata-rata ukuran butir berkisar antara 5,534-6,071 ϕ (Tabel 2).

Klasifikasi lanau kasar terlihat pada lapisan kedalaman 37-34 cm, 30-28 cm, dan 22-0 cm, serta lanau sedang pada kedalaman 34-30 cm dan 28-22 cm. Profil vertikalnya menunjukkan tren butiran yang semakin halus ke arah lapisan bawah dengan fluktuasi kecil. Hal ini mengindikasikan adanya variasi atau perubahan energi lingkungan masa lalu saat pengendapan. Karakteristik variabilitas ukuran butir secara vertikal ini divalidasi oleh analisis geokimia dari Wiguna *et al.* (2025), rasio Zr/Rb pada inti sedimen 29BC menunjukkan fluktuasi signifikan berkisar antara 0,821-1,419. Tren peningkatan rasio Zr/Rb ke arah lapisan atas menunjukkan terjadinya transisi menuju akumulasi fraksi sedimen yang lebih kasar akibat penguatan energi hidrodinamika secara temporal di lokasi tersebut. Profil vertikal pada inti sedimen 57BC menunjukkan nilai rata-rata ukuran butir berkisar antara 5,747-5,935 ϕ (Tabel 3), yang seluruh lapisan diklasifikasikan dalam lanau kasar. Berbeda dengan 29BC, profil vertikal 57BC cenderung homogen dengan fluktuasi yang sangat kecil. Pola ini menunjukkan proses sedimentasi di lokasi 57BC berlangsung dengan energi hidrodinamika yang relatif konstan dan stabil. Kondisi lingkungan yang stabil ini diperkuat oleh data proksi geokimia Wiguna *et al.* (2025) yang memperlihatkan profil rasio Zr/Rb yang konstan dan jauh lebih rendah, dengan kisaran 0,282-0,654 di sepanjang inti sedimen 57BC. Nilai rasio yang rendah dan stabil ini merefleksikan dominasi sedimen berbutir halus yang terendapkan secara berkelanjutan pada lingkungan berenergi rendah.

Kondisi hidrodinamika Laut Maluku, lebih detailnya terlihat pada parameter sortasi, kemencengan, dan kurtosis (Tabel 2; Tabel 3). Nilai sortasi dapat mengindikasikan tingkat keseragaman butiran sedimen yang merespon kondisi hidrodinamika (Liang *et al.*, 2020). Sortasi atau pemilahan didefinisikan sebagai penyebaran ukuran butir terhadap nilai rata-ratanya (Nugroho & Basit, 2014; Rachman *et al.*, 2023). Nilai sortasi yang semakin kecil menunjukkan sedimen tersortasi dengan baik akibat rentang penyebaran ukuran butir terhadap ukuran butir rata-rata yang pendek

Tabel 2. Nilai statistik ukuran butir pada perairan Laut Maluku (29BC)

Kedalaman (cm)	Tipe	Nilai rata-rata (M_z)	Sortasi (σ_1)	Skewness (S_{k1})	Kurtosis (K_G)
0-2	Unimodal	5,534 (CST)	1,567 (PS)	-0,081 (S)	1,024 (M)
2-4	Unimodal	5,840 (CST)	1,439 (PS)	-0,089 (S)	1,056 (M)
4-6	Unimodal	5,633 (CST)	1,678 (PS)	-0,142 (CSk)	1,044 (M)
6-8	Unimodal	5,856 (CST)	1,509 (PS)	-0,123 (CSk)	1,077 (M)
8-10	Unimodal	5,862 (CST)	1,519 (PS)	-0,119 (CSk)	1,078 (M)
10-12	Unimodal	5,846 (CST)	1,605 (PS)	-0,151 (CSk)	1,058 (M)
12-14	Unimodal	5,925 (CST)	1,530 (PS)	-0,130 (CSk)	1,044 (M)
14-16	Unimodal	5,962 (CST)	1,553 (PS)	-0,146 (CSk)	1,049 (M)
16-18	Unimodal	5,904 (CST)	1,592 (PS)	-0,151 (CSk)	1,021 (M)
18-20	Unimodal	5,952 (CST)	1,577 (PS)	-0,158 (CSk)	1,041 (M)
20-22	Unimodal	5,933 (CST)	1,510 (PS)	-0,105 (CSk)	1,027 (M)
22-24	Unimodal	6,066 (MST)	1,676 (PS)	-0,114 (CSk)	0,925 (M)
24-26	Unimodal	6,036 (MST)	1,630 (PS)	-0,147 (CSk)	0,980 (M)
26-28	Unimodal	6,029 (MST)	1,586 (PS)	-0,141 (CSk)	0,992 (M)
28-30	Unimodal	5,975 (CST)	1,660 (PS)	-0,134 (CSk)	0,957 (M)
30-32	Unimodal	6,071 (MST)	1,656 (PS)	-0,138 (CSk)	0,946 (M)
32-34	Unimodal	6,001 (MST)	1,590 (PS)	-0,145 (CSk)	1,001 (M)
34-37	Unimodal	5,975 (CST)	1,640 (PS)	-0,136 (CSk)	0,958 (M)

Keterangan: CST = lanau kasar; MST = lanau sedang; PS = tersortir buruk; S = simetris; CSk = menceng kasar; M = mesokurtik

Tabel 3. Nilai statistik ukuran butir pada perairan Laut Maluku (57BC)

Kedalaman (cm)	Tipe	Nilai rata-rata (M_z)	Sortasi (σ)	Skewness (S_k)	Kurtosis (K_G)
0-1	Unimodal	5,800 (CST)	1,414 (PS)	-0,008 (S)	0,931 (M)
1-2	Unimodal	5,883 (CST)	1,498 (PS)	-0,034 (S)	0,916 (M)
2-3	Unimodal	5,919 (CST)	1,517 (PS)	-0,041 (S)	0,938 (M)
3-4	Unimodal	5,935 (CST)	1,456 (PS)	-0,048 (S)	0,967 (M)
4-5	Unimodal	5,881 (CST)	1,459 (PS)	-0,028 (S)	0,943 (M)
5-6	Unimodal	5,918 (CST)	1,499 (PS)	-0,042 (S)	0,942 (M)
6-7	Unimodal	5,855 (CST)	1,502 (PS)	-0,049 (S)	0,933 (M)
7-8	Unimodal	5,795 (CST)	1,490 (PS)	-0,027 (S)	0,948 (M)
8-9	Unimodal	5,842 (CST)	1,537 (PS)	-0,052 (S)	0,942 (M)
9-10	Unimodal	5,848 (CST)	1,471 (PS)	-0,040 (S)	0,898 (P)
10-11	Unimodal	5,915 (CST)	1,491 (PS)	-0,032 (S)	0,933 (M)
11-12	Unimodal	5,845 (CST)	1,508 (PS)	-0,047 (S)	0,936 (M)
12-13	Unimodal	5,810 (CST)	1,403 (PS)	-0,023 (S)	0,960 (M)
13-14	Unimodal	5,747 (CST)	1,521 (PS)	-0,052 (S)	0,935 (M)
14-15	Unimodal	5,862 (CST)	1,503 (PS)	-0,031 (S)	0,927 (M)
15-16	Unimodal	5,878 (CST)	1,494 (PS)	-0,033 (S)	0,937 (M)
16-18	Unimodal	5,841 (CST)	1,526 (PS)	-0,031 (S)	0,913 (M)

Keterangan: CST = lanau kasar; PS = tersortir buruk; S = simetris; M = mesokurtik; P = platikurtik

(ukuran butir semakin seragam), sedangkan nilai sortasi semakin besar memperlihatkan sedimen tersortasi buruk karena rentang penyebarannya panjang (ukuran butiran semakin tidak seragam). Nilai sortasi pada inti sedimen 29BC (1,439-1,678 ϕ) maupun 57BC (1,403-1,537 ϕ) menunjukkan seluruh lapisan kedalaman berada dalam kategori tersortir buruk. Namun, mekanisme pemilahan yang buruk pada kedua lokasi memiliki penyebab yang berbeda. Pada inti sedimen 57BC, sortasi yang buruk dalam kondisi profil nilai rata-rata ukuran butir yang homogen dipengaruhi oleh posisi geografisnya yang berada lebih dekat dengan daratan bila dibandingkan dengan lokasi 29BC. Kedekatan secara spasial dengan daratan menyebabkan lokasi 57BC menerima suplai material terestrial heterogen secara konstan, baik melalui limpasan permukaan (*runoff*) maupun sistem drainase lokal dari pulau terdekat. Kondisi tersebut sejalan dengan temuan Cong *et al.* (2022) pada landasan kontinen bagian dalam Laut Cina Timur (sortasi 1,4-1,7 ϕ), yang menunjukkan bahwa lingkungan berenergi rendah yang menerima suplai sedimen sedimen secara kontinu akan menghasilkan profil sedimen homogen yang tetap tersortir buruk. Sebaliknya, nilai sortasi yang lebih tinggi (>1,7 ϕ) di bagian lain wilayah Laut Cina Timur umumnya merefleksikan pengendapan campuran akibat pengaruh suplai material dari berbagai sumber atau fluktuasi energi. Nilai pada inti sedimen 29BC secara umum cenderung mendekati 1,7 ϕ mengindikasikan ketidakstabilan energi arus periodik yang memicu terjadinya pencampuran antar fraksi dari berbagai sumber baik material dari daratan sekitarnya maupun yang berasal dari laut. Karakteristik sedimen yang didominasi tersortir buruk juga ditemukan pada subcekungan Simeulue, Indonesia dengan kisaran nilai sortasi 1,513-2,480 ϕ yang dikontrol oleh dinamika arus serta kontribusi material dari daratan pulau Sumatra (Nugroho & Putra, 2020).

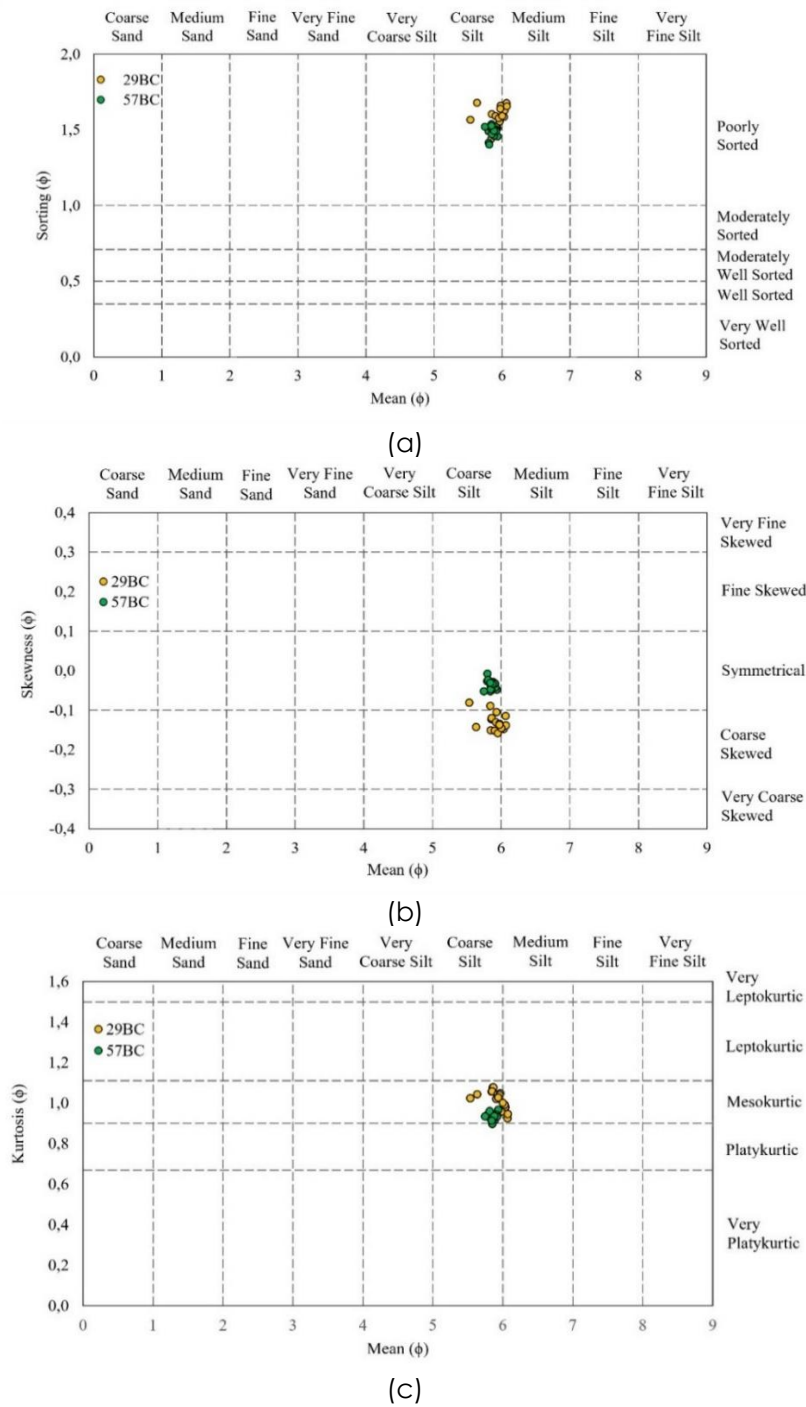
Perbedaan stabilitas energi kedua lokasi diperkuat oleh nilai kemencengan. Nilai kemencengan menggambarkan arah dominasi ukuran butir sedimen (Rachman *et al.*, 2023). Arah dominasi ukuran butir dapat simetris, condong ke arah berbutir halus (nilai kemencengan positif) atau kasar (nilai kemencengan negatif). Nilai yang diperoleh dapat digunakan untuk menggambarkan energi lingkungan yang berpengaruh dalam proses pengendapan (Jassim & Abbas, 2024). Kemencengan inti sedimen 29BC dan 57BC menunjukkan kondisi profil vertikal yang berbeda. Nilai kemencengan yang diperoleh pada 29BC (-0,158 hingga -0,081) termasuk kategori simetris hingga menceng berbutir kasar. Secara vertikal, lapisan bawah hingga tengah (37-4 cm) didominasi oleh karakteristik menceng berbutir kasar yang merekam pengaruh energi hidrodinamika

relatif kuat pada masa lampau. Akibatnya, suplai partikel kasar mendominasi, sedangkan partikel halus tertransportasi lebih jauh dari lingkungan pengendapan (Bila & Ardhani, 2025; Suhandi & Dwiputra, 2025). Selanjutnya, transisi menuju kategori simetris pada lapisan permukaan (4-0 cm) mengindikasikan terjadinya penurunan energi pengendapan seiring waktu, sehingga partikel halus mulai dapat mengendap secara seimbang dengan fraksi yang lebih kasar. Kemencengan inti sedimen 57BC (-0,052 hingga -0,008) secara konsisten berada dalam kategori simetris dari lapisan bawah hingga permukaan. Pola simetris yang stabil ini menunjukkan bahwa proporsi fraksi kasar dan halus terdistribusi secara merata di kedua sisi kurva (Purnawan *et al.*, 2016), yang mengindikasikan bahwa lingkungan pengendapan berada di luar jangkauan fluktuasi arus kuat.

Kurtosis (peruncingan) menggambarkan tingkat kepuncakan atau kedataran kurva distribusi terhadap distribusi normal. Kurva distribusi yang menyerupai distribusi normal disebut mesokurtik, sedangkan kurva yang runcing disebut leptokurtik, yang mengindikasikan adanya satu fraksi ukuran sedimen tertentu yang mendominasi. Sebaliknya, kurva yang cenderung datar disebut platikurtik, yang menunjukkan distribusi ukuran sedimen yang menyebar lebar akibat pencampuran beberapa fraksi tanpa adanya yang mendominasi (Rachman *et al.*, 2023). Karakteristik kurtosis menunjukkan bahwa kedua inti sedimen didominasi oleh kategori mesokurtik, dengan nilai 0,925-1,078 untuk 29BC dan 0,898-0,967 untuk 57BC (kecuali pada kedalaman 10-9 cm dengan karakteristik platikurtik). Dominasi mesokurtik ini mengindikasikan tingkat suplai sedimen yang moderat, mayoritas partikel terkonsentrasi di sekitar ukuran rata-rata tanpa adanya dominasi pada kedua ujung ekor distribusi (Nguyen *et al.*, 2025). Karakteristik kurva yang relatif seragam ini merefleksikan kondisi hidrodinamika pada lingkungan pengendapan yang konsisten. Namun, kehadiran lapisan platikurtik pada kedalaman 10-9 cm di inti sedimen 57BC mengindikasikan adanya pengaruh pengendapan episodik yang mencampur beberapa fraksi sedimen tanpa adanya satu fraksi tunggal yang dominan. Karakteristik platikurtik-mesokurtik dengan sortasi buruk juga ditemukan pada lereng benua (*continental slope*) Laut Cina Timur (Wang *et al.*, 2025).

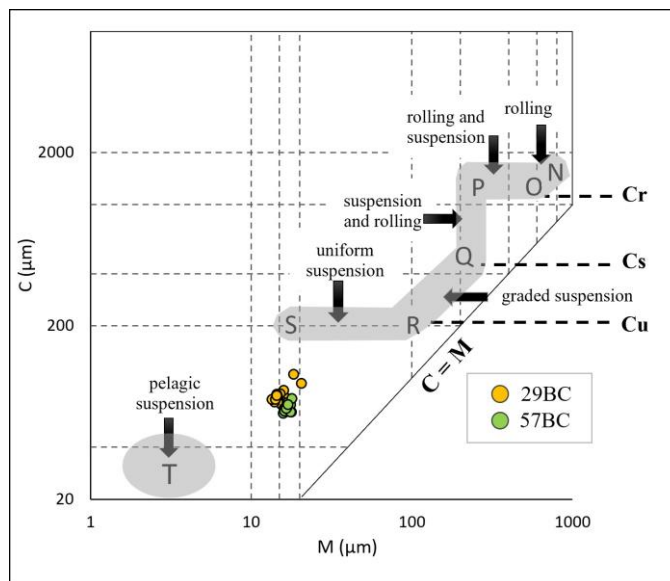
Analisis biplot hubungan antara nilai rata-rata dan sortasi, nilai rata-rata dan kemencengan, dan nilai rata-rata dan kurtosis di Laut Maluku memperlihatkan adanya klaster antara kedua inti sedimen (Gambar 3). Inti sedimen 57BC membentuk klaster yang sangat rapat dan terkonsentrasi pada zona lanau kasar dengan ciri tersortir buruk, simetris, dan mesokurtik. Sebaliknya, 29BC menunjukkan distribusi yang lebih menyebar, terutama pada plot kemencengan yang melebar dari kategori simetris hingga menceng berbutir kasar. Pola sebaran pada biplot menunjukkan bahwa lingkungan pengendapan 29BC lebih dinamis dan sensitif terhadap fluktuasi energi periodik dibandingkan dengan lingkungan 57BC yang stabil.

Karakteristik vertikal parameter ukuran butir pada inti sedimen 29BC dan 57BC merekam respon dari variabilitas hidrodinamika regional. Kondisi hidrodinamika tersebut dikontrol oleh karakteristik geomorfologi Laut Maluku yang merupakan laut semi tertutup, dikelilingi oleh banyak pulau dan selat yang sempit, namun tetap terbuka ke utara melalui pintu masuk utara Laut Maluku dan ke selatan melalui Selat Lifamatola (Suryadarma *et al.*, 2025). Pada skala musiman (Juni-Oktober), angin monsun tenggara yang kuat dan konsisten memicu intensitas *upwelling* dengan mendorong air permukaan ke arah utara di perairan terlindung antara Pulau Banggai dan Taliabu (Atmadipoera *et al.*, 2018). Akibat posisi geografisnya yang dekat dengan ekuator, efek Coriolis yang minimal di wilayah ini, menyebabkan massa air dari lapisan dalam (~60 m) terangkat dan menyebar hampir ke utara mengikuti arah angin. Variabilitas hidrodinamika lokal ini (intensitas *upwelling*) berkorelasi erat dengan dinamika antartahunan seperti *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO) yang memodulasi sirkulasi Arlindo. Dinamika lingkungan pengendapan di Laut Maluku dapat dipengaruhi oleh variabilitas iklim tersebut. Fase *El Niño* terbukti meningkatkan intensitas *upwelling* secara signifikan di perairan Indonesia bagian timur akibat penguatan angin pasat (Wirasatriya *et al.*, 2021). Pada fase *El Niño*, terjadi penguatan angin selatan yang signifikan di wilayah barat Laut Maluku sehingga mendorong transpor massa air ke utara dan menghasilkan arus meridional kuat hingga mencapai 0,5 m/s di lapisan atas (Dompeipen, 2024). Kecepatan arus yang relatif kuat tersebut memicu aktivitas *upwelling* aktif dan ketidakstabilan arus periodik di lokasi 29BC. Lokasi 29BC



Gambar 2. Plot bivariat hubungan antara a) nilai rata-rata dan sortasi, b) nilai rata-rata dan kemencengan, dan c) nilai-rata dan kurtosis di Laut Maluku

yang berada dekat dengan pusat aktivitas *upwelling*, menyebabkan inti sedimen lebih sensitif dalam merekam fluktuasi temporal tersebut, menghasilkan fluktuasi ukuran butir dan kemencengan kasar pada profil vertikal. Sebaliknya, intensitas *upwelling* pada fase *La Niña* melemah secara drastis, ditandai oleh pembalikan arus yang dominan ke selatan dengan kecepatan relatif rendah (maksimum 0,2 m/s) serta kondisi lapisan air yang lebih hangat dan stabil (Dompeipen, 2024). Kondisi energi hidrodinamika yang relatif rendah ini yang terekam secara konstan pada lokasi 57BC yang berada di luar pusat aktivitas *upwelling* aktif.



Gambar 3. Diagram C-M pada perairan Laut Maluku (29BC; 57BC)

Analisis mekanisme transportasi menggunakan diagram C-M (

Gambar 3) menunjukkan inti sedimen 29BC dan 57BC pada perairan Laut Maluku didominasi oleh mekanisme transportasi suspensi seragam (kedua lokasi terkonsentrasi pada area di bawah segmen R-S). Mekanisme transportasi sedimen secara umum dapat terjadi secara *bedload* dan *suspension load* (Nugroho & Basit, 2014; Passega, 1957, 1964). Mekanisme *bedload* dapat terjadi pada fraksi sedimen kasar dengan pergerakan transportasi arus traksi dalam bentuk *rolling* (menggeling), *sliding* (terseret), *creep* (merayap) dan saltasi. Sebaliknya, *suspension load* mentranspor fraksi halus dalam bentuk suspensi yang dapat terangkut jauh dari titik sumber sebelum akhirnya mengendap. Pada lingkungan laut dalam, arus laut umumnya mengangkut lempung dan lanau secara suspensi serta mengangkut pasir dengan proses traksi (*bedload*) (Surjono & Amijaya, 2017). Pola dominasi suspensi seragam pada inti sedimen 29BC dan 57BC merefleksikan bahwa deposisi sedimen di lokasi penelitian utamanya berasal dari pengendapan partikel halus dalam kolom air yang terjadi pada kondisi lingkungan pengendapan berenergi relatif rendah. Mekanisme sedimentasi laut melalui suspensi seragam juga terlihat pada perairan Sumba, Nusa Tenggara Timur-Indonesia (Putra & Nugroho, 2017). Karakteristik suspensi seragam di Laut Maluku didukung oleh peran sirkulasi Arlindo di Laut Maluku yang mengalirkan massa air dari jalur utara dan selatan, lalu mengalami resirkulasi pada lapisan termoklin serta lapisan menengah sebelum kembali ke Samudra Pasifik (Suryadarma *et al.*, 2025; Yuan *et al.*, 2018, 2022). Kondisi ini diperkuat oleh karakteristik laut Maluku sebagai laut semi tertutup (Suryadarma *et al.*, 2025; Suteja *et al.*, 2025) sehingga menjadi zona akumulasi atau perangkap yang efektif untuk partikel halus. Kombinasi tersebut memiliki peran krusial dalam mengontrol transportasi sedimen tersuspensi, deposisi partikel halus, serta membentuk hamparan endapan sedimen dasar laut di Laut Maluku.

KESIMPULAN

Analisis ukuran butir pada inti sedimen 29BC dan 57BC di Laut Maluku menunjukkan bahwa kedua lokasi didominasi oleh fraksi lanau kasar dengan pola distribusi unimodal yang ditransportasikan melalui mekanisme suspensi seragam (*uniform suspension*) di lingkungan laut semi tertutup berenergi relatif rendah. Karakteristik nilai rata-rata pada inti sedimen 29BC dan 57BC berkisar antara 5,534-6,071 ϕ (lanau kasar hingga lanau sedang) dan 5,747-5,935 ϕ (lanau kasar). Untuk nilai sortasi pada inti sedimen 29BC dan 57BC berkisar antara 1,439-1,678 ϕ dan 1,403-1,537 ϕ . Nilai kedua lokasi tersebut mengindikasikan kondisi tersortir buruk. Nilai kemencengan pada inti

sedimen 29BC dan 57BC berkisar antara -0,158 hingga -0,081 dan -0,052 hingga -0,008. Nilai kemencengan yang diperoleh pada inti sedimen 29BC termasuk kategori simetris hingga condong berbutir kasar, sedangkan 57BC termasuk kategori simetris. Selanjutnya, nilai kurtosis pada inti sedimen 29BC dan 57BC berkisar antara 0,925-1,078 dan 0,898-0,967. Inti Sedimen 29BC dicirikan dengan dominannya mesokurtik, sedangkan 57BC dicirikan oleh platikurtik hingga mesokurtik (didominasi mesokurtik). Meskipun sama-sama dikategorikan tersortir buruk, kedua lokasi merekam stabilitas hidrodinamika masa lalu yang berbeda, lokasi 29BC bersifat lebih dinamis dan fluktuatif dengan tren peningkatan ukuran butir ke arah permukaan serta kemencengan berbutir kasar akibat posisinya yang dekat dengan pusat aktivitas *upwelling* aktif yang dipicu oleh penguatan angin dan arus meridional selama fase El Niño. Sebaliknya, lokasi 57BC menunjukkan profil vertikal yang homogen, simetris, dan stabil, merefleksikan kondisi pengendapan berenergi relatif rendah yang konsisten di luar jangkauan fluktuasi arus kuat (di luar area *upwelling*). Hal tersebut serupa dengan kondisi tenang pada fase La Niña yang juga dipengaruhi oleh konstannya suplai material terestrial heterogen karena posisi geografisnya yang lebih dekat dengan daratan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Pusat Pelayanan Pembiayaan dan Asesmen Pendidikan Tinggi (PPAPT), Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi Republik Indonesia (Kemendiknas) yang mengelola Beasiswa Pendidikan Indonesia (BPI) atas dukungan pendanaan kegiatan akademik dan penelitian ini (No. 01321/J5.2.3./BPI.06/9/2022). Dukungan ini juga terafiliasi dengan Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP), Kementerian Keuangan Republik Indonesia. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada kru Baruna Jaya VIII serta Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) atas bantuan teknis dalam pengumpulan data lapangan dan penyediaan fasilitas laboratorium.

REFERENCES

- Astriandhita, K. M., Winantris, W., Muljana, B., Putra, P. S., & Praptisih, P. (2017). Depositional process dynamic in Kaligarang Delta, Semarang. *Riset Geologi Dan Pertambangan*, 27(2), 169–177. doi: 10.14203/risetgeotam2017.v27.485
- Atmadipoera, A. S., Khairunnisa, Z., & Kusuma, D. W. (2018). Upwelling characteristics during El Nino 2015 in Maluku Sea. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 176(1), 012018. doi: 10.1088/1755-1315/176/1/012018
- Badawi, A., Mansour, A. M., & Madkour, H. A. (2022). Texture variability of clastic marine sediments across three major Harbours along the Egyptian Red Sea coast. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 48(4), 333–341. doi: 10.1016/j.ejar.2022.11.006
- Bastami, K. D., Neyestani, M. R., Esmailzadeh, M., Haghparast, S., Alavi, C., Fathi, S., Nourbakhsh, S., Shirzadi, E. A., & Parhizgar, R. (2017). Geochemical speciation, bioavailability and source identification of selected metals in surface sediments of the Southern Caspian Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 114(2), 1014–1023. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.11.025
- Bila, E. S., & Ardhani, N. (2025). Analysis of grain size types of sediments in Situbondo waters using the wet sieving method. *Jurnal Hidrografi Indonesia*, 7(2), 83–90. doi: 10.62703/jhi.v7i2.193
- Blott, S. J., & Pye, K. (2001). Gradistat: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11), 1237–1248. doi: 10.1002/esp.261
- Cong, J., Zhang, Y., Hu, G., Mi, B., Kong, X., Xue, B., Ning, Z., & Yuan, Z. (2022). Textures, provenances, and transport patterns of sediment on the inner shelf of the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 232(7), 104624. doi: 10.1016/j.csr.2021.104624
- Dompeipen, A. C. (2024). *Vertical Structure and Interannual Variability of Upwelling in Banggai Waters, Maluku Sea* [Thesis]. Bogor: IPB University. (hlm 1-43)
- Elias, M. S., Ibrahim, S., Samudring, K., Rahman, S. A., & Hashim, A. (2018). The sources and ecological risk assessment of elemental pollution in sediment of Linggi estuary, Malaysia. *Marine Pollution Bulletin*, 137, 646–655. doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.11.006

- Fitriyan, U., Dwi Mandini Manessa, M., Hamzah, F., Rugebregt, M. J., Zuraida, R., & Atmadipoera, A. S. (2023). Historical study of upwelling in Banggai waters based on remote sensing data. *Eur. Chem. Bull*, 12(5), 6005–6016.
- Folk, R. L., & Ward, W. C. (1957). Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, 27(1), 3–26. doi: 10.1306/74d70646-2b21-11d7-8648000102c1865d
- Gao, M. sheng, Hou, G. hua, Dang, X. zhang, & Huang, X. yong. (2020). Sediment distribution characteristics and environment evolution within 100 years in western Laizhou Bay, Bohai Sea, China. *China Geology*, 3(3), 445–454. doi: 10.31035/cg2020036
- Ge, J., Li, Q., Zhao, X., Pang, W., Fan, Q., Cheng, X., & Zhang, X. (2024). Grain size of Quaternary sediments in the continental shelf-margin: implications for paleo-environment in the Northwestern South China Sea. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1–14. doi: 10.3389/fmars.2024.1489786
- Ghsoub, M., Fakhri, M., Courp, T., Khalaf, G., Buscail, R., & Ludwig, W. (2020). River signature over coastal area (Eastern Mediterranean): Grain size and geochemical analyses of sediments. *Regional Studies in Marine Science*, 35, 1–15. doi: 10.1016/j.rsma.2020.101169
- Jassim, F. N., & Abbas, S. A. (2024). Analysis of statistical parameters of sediment grain size distribution for Tigris River downstream Kut Barrage, Iraq. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 11(12), 3489–3498. doi: 10.18280/mmep.111227
- Kang, X., Song, J., Yuan, H., Li, X., Li, N., & Duan, L. (2018). Historical trends of anthropogenic metals in sediments of Jiaozhou Bay over the last century. *Marine Pollution Bulletin*, 135, 176–182. doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.07.010
- Kasim, S. A., Ismail, M. S., & Ahmed, N. (2023). Grain size statistics and morphometric analysis of Kluang-Niyor, Layang-Layang, and Kampung Durian Chondong Tertiary Sediments, Onshore Peninsular Malaysia: Implications for paleoenvironment and depositional processes. *Journal of King Saud University - Science*, 35(2), 102481. doi: 10.1016/j.jksus.2022.102481
- Leszczyńska, K., Moskalewicz, D., & Statterger, K. (2024). Statistical approach to identify storm deposits and cryptic event layers from grain-size data, Mechelinki, Poland, Baltic Sea. *Catena*, 242. doi: 10.1016/j.catena.2024.108130
- Liang, J., Liu, J., Xu, G., & Chen, B. (2020). Grain-size characteristics and net transport patterns of surficial sediments in the Zhejiang nearshore area, East China Sea. *Oceanologia*, 62(1), 12–22. doi: 10.1016/j.oceano.2019.06.002
- Liu, Z., Pan, S., Sun, Z., Ma, R., Chen, L., Wang, Y., & Wang, S. (2015). Heavy metal spatial variability and historical changes in the Yangtze River estuary and North Jiangsu tidal flat. *Marine Pollution Bulletin*, 98(1–2), 115–129. doi: 10.1016/j.marpolbul.2015.07.006
- Mohtar, W. H. M. W., Nawang, S. A. B., Abdul Maulud, K. N., Benson, Y. A., & Azhary, W. A. H. W. M. (2017). Textural characteristics and sedimentary environment of sediment at eroded and deposited regions in the severely eroded coastline of Batu Pahat, Malaysia. *Science of the Total Environment*, 598, 525–537. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.093
- Mycielska-Dowgiałło, E., & Ludwikowska-Kedzia, M. (2011). Alternative interpretations of grain-size data from quaternary deposits. *Geologos*, 17(4), 189–203. doi: 10.2478/v10118-011-0010-9
- Nguyen, H. H., Trinh, T. L., & Nguyen, V. T. (2025). Sedimentary Facies of the Miocene In Block 103, Offshore Northern Vietnam: Grain Size Distribution Based on SEM Analysis. *Inzynieria Mineralna*, 1(2), 375–384. doi: 10.29227/IM-2025-02-31
- Nugroho, S. H., & Basit, A. (2014). Sediment distribution based on grain size analyses in Weda Bay, Northern Maluku. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, 6(1), 229–240. doi: 10.29244/jitkt.v6i1.8644
- Nugroho, S. H., & Putra, P. S. (2018). Spatial distribution of grain size and depositional process in tidal area along Waikelu Beach, Sumba. *Marine Georesources and Geotechnology*, 36(3), 299–307. doi: 10.1080/1064119X.2017.1312649
- Nugroho, S. H., & Putra, P. S. (2019). Characteristics of grain size distribution on beaches sediment of Sumba Island, Nusa Tenggara Timur based on grainsize and geochemical Data. *Jurnal Geologi Dan Sumberdaya Mineral*, 20(3), 153. doi: 10.33332/jgsm.geologi.v20i3.414
- Nugroho, S. H., & Putra, P. S. (2020). Determining textural and geochemical element characteristics

- of seafloor sediment using multivariate analysis along the Simeulue sub-basin, Indonesia. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, 35(4), 79–92. doi: 10.17794/rgn.2020.4.7
- Olatinsu, O. B., Ogieva, M. O., Ishola, K. S., & Ige-Adeyeye, A. A. (2025). Integrated pore size and grain size characterization of geomaterials from Ewekoro, Eastern Dahomey Basin. *Geosystems and Geoenvironment*, 4(4), 100428. doi: 10.1016/j.geogeo.2025.100428
- Ovsepyan, E., Dorokhova, E., Ovsepyan, Y., Aliev, R., & Jin, Y. K. (2025). Grain-size and geochemical evidence for sediment transport mechanisms in the northeastern part of the East Siberian Sea and on the adjacent continental slope. *Journal of Marine Systems*, 252, 104140. doi: 10.1016/j.jmarsys.2025.104140
- Passega, R. (1957). Texture as characteristic of clastic deposition. *Bulletin of The American Association of Clastic Deposition*, 41(9), 1952–1984. doi: 10.1306/OBDA594E-16BD-11D7-8645000102C1865D
- Passega, R. (1964). Grain size representation by CM patterns as a geological tool. *Journal of Sedimentary Petrology*, 34(4), 830–847. doi: 10.1306/74D711A4-2B21-11D7-8648000102C1865D
- Passega, R., & Byramjee, R. (1969). Grain-size image of clastic deposits. *Sedimentology*, 13(3–4), 233–252. doi: 10.1111/j.1365-3091.1969.tb00171.x
- Purnawan, S., Alamsyah, T. P. F., Setiawan, I., Rizwan, Ulfah, M., & El Rahimi, S. A. (2016). Sediment distribution analysis in Balohan Bay, Sabang. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, 8(2), 531–538. doi: 10.29244/jitkt.v8i2.15812
- Putra, P. S., & Nugroho, S. H. (2017). Subsurface sediment distribution in the Sumba Waters, East Nusa Tenggara. *Oseanologi Dan Limnologi Di Indonesia*, 2(3), 49–63. doi: 10.14203/oldi.2017.v2i3.118
- Rachman, R. A., Armono, H. D., Wibowo, M., & Istiyanto, D. C. (2023). Study of bed load characteristics in Tanjung Pasir Banten based on gradistat method. *Buletin Oseanografi Marina*, 12(2), 201–212. doi: 10.14710/buloma.v12i2.48287
- Rahman, M., Das, R. S., Khan, M. S. I., Hossain, M. I. S., Faruque, M. E., Khan, N. S., & Siddique, M. A. M. (2022). Textural characteristics of surficial sediments along the Noakhali coast, Bangladesh: An implication for mineral placer deposits exploration. *Regional Studies in Marine Science*, 52, 1–9. doi: 10.1016/j.rsma.2022.102304
- Santos, C. B. dos, Corrêa, I. S., Weschenfelder, J., & Stone, J. R. (2025). Grain-size parameters and diatom records as indicators of environmental changes along the southern Brazilian coastal plain. *International Journal of Sediment Research*, 40(2), 269–285. doi: 10.1016/j.ijsrc.2025.01.005
- Selvaraj, V., Singarasubramanian, S. R., & Sujanraj, K. (2017). Depositional mechanism of sediments through size analysis from the core of Arasalar river near Karaikkal, east coast of India. *Article in Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 46(10), 2122–2131.
- Setyanta, B., & Setiadi, I. (2011). Model of crustal subduction structure in the waters of the Maluku Sea and volcanism based on gravity and seismic analysis. *Journal of Geology and Mineral Resources*, 21(4), 213–223. doi: 10.33332/jgsm.geologi.v21i4.148
- Suhanda, D., & Dwiputra, M. A. (2025). Analyzing sediment characteristics between intertidal and supratidal zones at Kelapa Kunjir Beach, Lampung Indonesia. *Scientific Nexus*, 1(1), 2258. doi: 10.35472/scinexus.2258
- Surjono, S. S., & Amijaya, D. H. (2017). *Sedimentologi* (1st ed.). Gadjah Mada University Press.
- Suryadarma, M. W., Atmadipoera, A. S., Nugroho, D., Naulita, Y., Zuraida, R., & Apriansyah. (2025). Indonesian throughflow water and its circulation in the Maluku Sea: An evaluation using the CROCO model. *Regional Studies in Marine Science*, 82(1), 104047. doi: 10.1016/j.rsma.2025.104047
- Suryani, H., Jamal, E., & Yusman. (2025). Sediment characteristics of the Matangnga River (upstream) and Maloso River (Downstream) in Polewali Mandar Regency based on granulometric analysis. *Bandar: Journal of Civil Engineering*, 7(1), 42–50. doi: 10.31605/bjce.v7i1.5077
- Suteja, Y., Atmadipoera, A. S., Priatna, A., Patria, M. P., Suryadarma, M. W., Latuapo, N., Purwiyanto, A. I. S., & Zuraida, R. (2025). Microplastic contamination during the peak of upwelling in Maluku Sea, Indonesia. *Environmental Pollution*, 383, 126923. doi: 10.1016/j.envpol.2025.126923
- Wang, L., Zhai, B., Zhang, X., Zhang, X., Sun, Z., Zhao, J., Zhang, Y., & Dou, Y. (2025). Detrital and authigenic minerals across the continental slope of the East China Sea, evidence for sedimentary provenance and environmental changes since the Last Glacial Maximum. *Deep-*

Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 226, 104623. doi: 10.1016/j.dsr.2025.104623

- Wiguna, T., Zuraida, R., Atmadipoera, A. S., Yuwono, F. S., Hernawan, U., Christanti, V., Tournier, N., Damanik, A., Vogel, H., & Cahyarini, S. Y. (2025). Upwelling influence on environmental change and sedimentation dynamics from trace fossils in the Molucca Sea: implications for sediment dating. *Bulletin of the Marine Geology*, 40(1), 1–12. doi: 10.32693/bomg.40.1.2025.896
- Wirasatriya, A., Susanto, R. D., Kunarso, K., Jalil, A. R., Ramdani, F., & Puryajati, A. D. (2021). Northwest monsoon upwelling within the Indonesian seas. *International Journal of Remote Sensing*, 42(14), 5437–5458. doi: 10.1080/01431161.2021.1918790
- Yuan, D., Li, X., Wang, Z., Li, Y., Wang, J., Yang, Y., Hu, X., Tan, S., Zhou, H., Wardana, A. K., Surinati, D., Purwandana, A., Ismail, M. F. A., Avianto, P., Dirhamsyah, D., Arifin, Z., & Von Storch, J. S. (2018). Observed transport variations in the Maluku Channel of the Indonesian seas associated with western boundary current changes. *Journal of Physical Oceanography*, 48(8), 1803–1813. doi: 10.1175/JPO-D-17-0120.1
- Yuan, D., Yin, X., Li, X., Corvianawatie, C., Wang, Z., Li, Y., Yang, Y., Hu, X., Wang, J., Tan, S., Surinati, D., Purwandana, A., Wardana, A. K., Ismail, M. F. A., Budiman, A. S., Bayhaqi, A., Avianto, P., Santoso, P. D., Kusmanto, E., ... & Pratt, L. J. (2022). A Maluku Sea intermediate western boundary current connecting Pacific Ocean circulation to the Indonesian Throughflow. *Nature Communications*, 13(1), 2093. doi: 10.1038/s41467-022-29617-6
- Zhou, X., Sun, L., Huang, W., Liu, Y., Jia, N., & 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. doi: 10.1016/j.csr.2013.07.011