

Distribusi Zooplankton Berdasarkan Hambur Balik Acoustic Doppler Current Profiler di Estuari Sungai Musi

Heron Surbakti^{1*}, Riris Aryawati¹, Isnaini¹, Zwuora Aeesah Oyono¹, Tengku Zia Ulqodry¹,
I Wayan Nurjaya², Muhammad Ishak Jumarang³

¹Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya Palembang-Prabumulih KM 32 Indralaya, Kab Ogan Ilir, Sumatera Selatan 30862, Indonesia

²Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor Dramaga, Bogor, Jawa Barat 16128, Indonesia

³Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Tanjungpura Jl. Prof. Dr. H. Hadari Nawawi 78124 Pontianak Kalimantan Barat, 78124, Indonesia

Email: *heronsurbakti@unsri.ac.id

Abstrak

Penelitian ini mengkaji distribusi vertikal dan temporal zooplankton di estuari tropis dangkal menggunakan intensitas gema *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) 492 kHz yang dikonversi menjadi *Mean Volume Backscattering Strength* (MVBS), divalidasi dengan data zooplankton in situ. ADCP dipasang di dasar perairan selama 17 jam (03:00–20:09 WIB) pada 15 Oktober 2025 di Estuari Sungai Musi, dilengkapi profil CTD per jam dan sampel jaring zooplankton pada tiga lapisan kedalaman. Sebanyak 21 taksa dari 5 filum dan 8 kelas teridentifikasi, dengan Copepoda dominan (56–78%). MVBS berkisar –211 hingga –3 dB (median –153 dB); 332 titik data pada rentang –100 hingga –60 dB diinterpretasikan sebagai hamburan biologis. Lapisan hamburan persisten terdeteksi pada kedalaman 6,5–9 m dengan puncak di 9 m (MVBS $\approx$ –76 dB) dan intensifikasi pada sore hari, bertepatan dengan kenaikan kelimpahan (2.500–4.000 ind m^{–3}) dan keanekaragaman sedang ($H' = 1,32$ – $1,74$) pukul 18:00–20:00. Korelasi Spearman menunjukkan hubungan *positif moderate* antara MVBS dan log₁₀ kelimpahan ($\rho \approx 0,57$; $p < 0,05$), bergantung pada lapisan kedalaman. Temuan ini menegaskan hambur balik ADCP terkoreksi hidrografi efektif sebagai proksi distribusi vertikal dan dinamika sub-harian zooplankton, meski sebagai estimator kuantitatif kelimpahan masih dibatasi komposisi komunitas, kedalaman kolom air, dan *noise* latar estuari.

Kata kunci: estuari tropis; distribusi zooplankton; hambur balik ADCP; MVBS; estuari Sungai Musi

Abstract

Zooplankton Distribution from Acoustic Doppler Current Profiler Backscatter in the Musi River Estuary

This study examines the vertical and temporal distribution of zooplankton in a shallow tropical estuary using 492 kHz Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) echo intensity converted to mean volume backscattering strength (MVBS), and validates it against in situ zooplankton data. The ADCP was bottom-mounted for 17 hours (03:00–20:09 WIB) on 15 October 2025 in the Musi River Estuary, with hourly CTD profiles and net sampling at three depth layers. Twenty-one taxa from 5 phyla and 8 classes were identified, with copepods dominant (56–78%). MVBS ranged from –211 to –3 dB (median –153 dB); 332 data points within –100 to –60 dB were interpreted as biological backscatter. A persistent scattering layer occurred at 6.5–9 m depth, peaking at 9 m (MVBS $\approx$ –76 dB), with late-afternoon intensification coinciding with increased abundance (2,500–4,000 ind m^{–3}) and moderate diversity ($H' = 1.32$ – 1.74) at 18:00–20:00. Spearman correlation showed a moderate positive relationship between MVBS and log₁₀ abundance ($\rho \approx 0.57$; $p < 0.05$), depending on depth strata. These findings confirm that hydrographically corrected ADCP backscatter is an effective proxy for zooplankton vertical distribution and sub-daily dynamics. However, direct abundance estimation remains constrained by community composition, water-column depth, and estuarine background noise.

Keywords: tropical estuary; zooplankton distribution; ADCP backscatter; MVBS; Musi River estuary

PENDAHULUAN

Estuari di kawasan tropis memiliki peran penting sebagai penghubung antara perairan sungai dan laut pesisir, yang mendukung produktivitas primer yang tinggi serta berfungsi sebagai daerah asuhan bagi komunitas zooplankton dan nekton yang menjadi penyokong utama jaring makanan pesisir (Bharathi *et al.*, 2022; Burford & Faggotter, 2021; Rosas *et al.*, 2024). Pemahaman terhadap dinamika spasial dan temporal zooplankton di lingkungan ini sangat esensial untuk menilai fungsi ekosistem, siklus biogeokimia, serta respons sistem pesisir terhadap tekanan antropogenik dan perubahan iklim (Nandy & Mandal, 2020; Wong *et al.*, 2022). Namun, metode konvensional berbasis jaring hanya menghasilkan gambaran diskret dalam ruang dan waktu, sehingga sering kali melewatkan struktur vertikal berskala halus dan variabilitas jangka pendek yang dikendalikan oleh pasang surut, stratifikasi, dan perilaku harian zooplankton (Bandara *et al.*, 2021).

Metode akustik telah berkembang menjadi instrumen yang semakin andal untuk mempelajari organisme pelagis dan lapisan penghambur suara di berbagai lingkungan oseanik. *Echosounder* multifrekuensi dan hambur balik ADCP telah digunakan untuk mengestimasi biomassa zooplankton, migrasi vertikal harian (*diel vertical migration*, DVM), dan variabilitas musiman lapisan hamburan (Abdullah *et al.*, 2025; Cisewski *et al.*, 2021; Dwinovantyo *et al.*, 2018; Gjørseter *et al.*, 2017; Cisewski & Strass, 2016). ADCP yang secara konvensional digunakan untuk mengukur profil arus dapat pula dimanfaatkan sebagai sensor akustik oportunistik untuk mengamati distribusi zooplankton dengan mengonversi intensitas gema menjadi MVBS (Aparna *et al.*, 2022; Howe *et al.*, 2019; Maharani *et al.*, 2024; Napitupulu *et al.*, 2024).

Terdapat beberapa kesenjangan kritis dalam penerapan hambur balik ADCP untuk pemantauan zooplankton di estuari tropis yang dangkal. Pertama, studi ADCP–zooplankton sebelumnya di perairan Indonesia berfokus pada lingkungan laut terbuka yang lebih dalam (> 100 m) dengan variabilitas salinitas tidal terbatas (Maharani *et al.*, 2024; Napitupulu *et al.*, 2024). Belum ada penelitian yang menerapkan hambur balik ADCP frekuensi tinggi di estuari tropis dangkal (≤ 12 m) dengan fluktuasi salinitas ekstrem (< 3 hingga > 25 PSU dalam satu siklus pasang surut). Kedua, studi sebelumnya umumnya bergantung pada interpretasi *echogram* kualitatif tanpa validasi statistik formal terhadap data jaring zooplankton yang teridentifikasi secara taksonomi. Ketiga, struktur komunitas zooplankton (keanekaragaman, keseragaman, dominansi) belum pernah dikaitkan secara langsung dengan pola MVBS di estuari Sumatera. Penelitian ini mengatasi kesenjangan tersebut dengan menyajikan analisis kuantitatif pertama yang secara simultan mengintegrasikan hambur balik ADCP, identifikasi taksa zooplankton, dan indeks biodiversitas di Estuari Sungai Musi, Indonesia.

Sepengetahuan penulis, belum ada penelitian yang secara khusus mengkaji dinamika zooplankton di Estuari Sungai Musi menggunakan pendekatan hambur balik akustik, sehingga kajian ini menjadi penting mengingat meningkatnya tekanan antropogenik—seperti lalu lintas pelayaran, reklamasi, dan perubahan tata guna lahan di daerah aliran sungai—terhadap fungsi ekologis estuari ini (Rosas *et al.*, 2024; Nandy & Mandal, 2020). Estuari Sungai Musi memiliki tipe pasang surut diurnal dengan bilangan Formzahl $F = 3,54$ (Heltria *et al.*, 2021), yang menentukan pola pencampuran dan stratifikasi kolom air dan, pada gilirannya, mempengaruhi distribusi vertikal zooplankton. Karakteristik hidrodinamika tersebut, dikombinasikan dengan statusnya sebagai salah satu estuari tropis terbesar di Sumatera Selatan, menjadikan lokasi ini representatif untuk mempelajari dinamika zooplankton dalam konteks estuari tropis yang dinamis.

MATERI DAN METODE

Lokasi Penelitian dan Pengukuran Lapangan

Pengukuran ADCP, profil CTD, dan pengambilan sampel zooplankton dilakukan pada satu stasiun di kawasan estuari Sungai Musi ($2^{\circ}20,966'S$, $104^{\circ}54,671'E$), yang juga merupakan lokasi penempatan ADCP (Gambar 1), dengan kedalaman air ≈ 12 m. Pengukuran dilaksanakan pada 15 Oktober 2025, yang mewakili awal musim hujan di Sumatera Selatan; tanggal ini dipilih secara sengaja karena periode transisi ini dicirikan oleh meningkatnya debit sungai dan penurunan salinitas permukaan secara tajam dalam waktu singkat, sehingga menghasilkan gradien salinitas dan pencampuran pasang surut yang kuat dalam satu siklus pengamatan—kondisi ini representatif untuk menguji kepekaan MVBS ADCP terhadap dinamika estuari tropis dangkal serta respons komunitas zooplankton terhadapnya. ADCP tipe Sentinel V berfrekuensi 492 kHz dipasang di dasar perairan dalam mode upward-looking dengan ukuran bin 0,5 m, jarak blanking 0,3 m, dan jangkauan bin pertama 1 m (cakupan vertikal efektif 1–12 m). Kecepatan arus dan intensitas gema direkam pada interval ≈ 1 menit dari 03:00 hingga 20:09 WIB, mencakup satu siklus pasang surut.

Sampel zooplankton dikumpulkan menggunakan jaring plankton vertikal berdiameter mulut 0,5 m dan ukuran mata jaring 200 μm pada tiga lapisan kedalaman: lapisan atas (0–2 m), lapisan tengah (2–5 m), dan lapisan bawah (5–8 m), masing-masing pada pukul 02:00, 04:00, 06:00, 08:00, 10:00, 12:00, 14:00, 16:00, 18:00, dan 20:00 WIB. Volume air tersaring dihitung dari luas penampang mulut jaring dan jarak penarikan vertikal.

Pencacahan dilakukan dalam tiga ulangan subsampel per sampel untuk meningkatkan keterwakilan taksa. Identifikasi taksonomi mengacu pada buku identifikasi Thorp & Covich (2010) dan Conway *et al.* (2003), dilakukan hingga tingkat kelas dan genus. Profil vertikal suhu dan salinitas diukur menggunakan CTD pada interval 0,5 m, mencakup seluruh kolom air pada setiap waktu pengambilan sampel.

Analisis Zooplankton

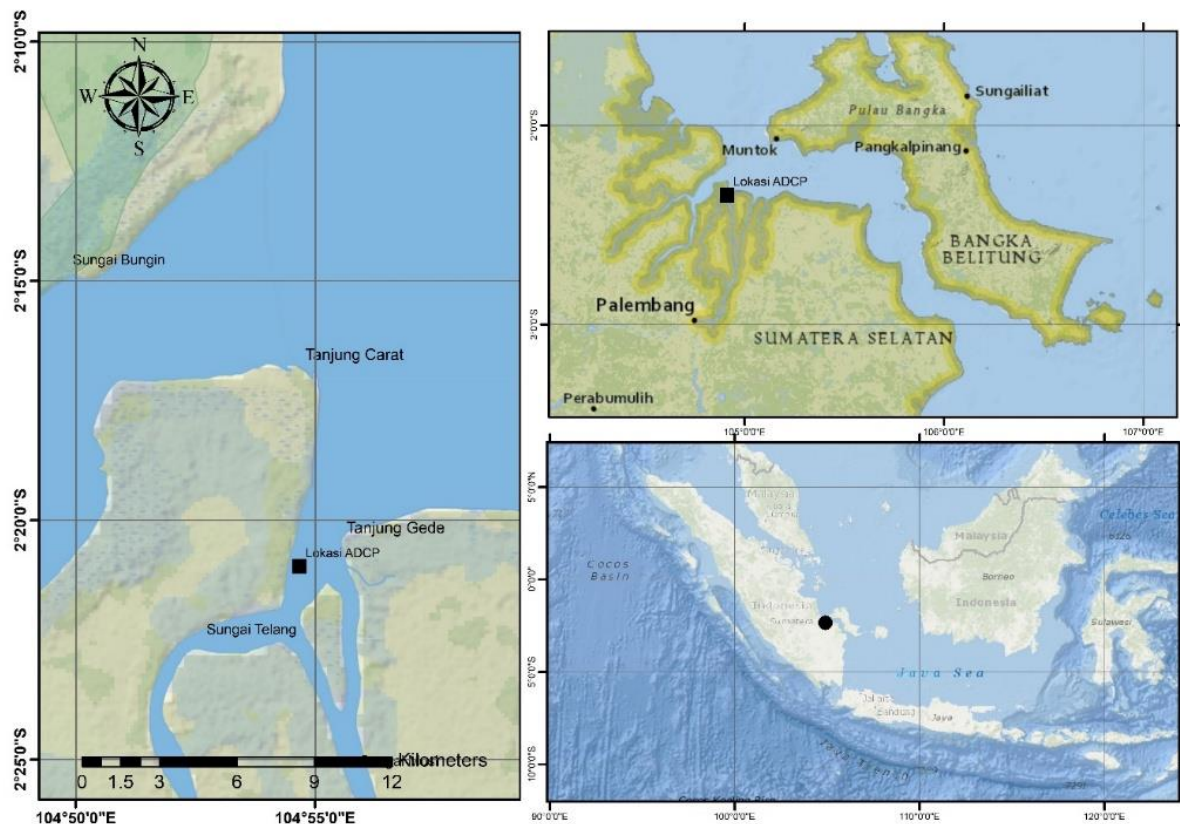
Kelimpahan zooplankton (D , ind m^{-3}) dihitung menggunakan persamaan Wickstead (1965):

$$D = \frac{q}{(f \times v)}$$

dengan q adalah jumlah individu yang tercacah, f adalah rasio volume diamati terhadap volume tersaring (ml/ml), dan v adalah volume air yang disaring (liter). Indeks keanekaragaman Shannon-Wiener (H'), indeks keseragaman Evennes (E'), dan indeks dominansi Simpson (C) dihitung menggunakan rumus Odum (1993, 1996):

$$H' = -\sum p_i \ln p_i; \quad E' = H' / H'_{\text{maks}}; \quad C = \sum (n_i / N)^2$$

dengan p_i = proporsi individu taksa ke- i (n_i/N) dan $H'_{\text{maks}} = \ln S$ (S = jumlah jenis). Komposisi jenis (P_i) dihitung menggunakan persamaan Odum (1996): $P_i = (n_i/N) \times 100\%$.



Gambar 1. Peta lokasi stasiun pengukuran ADCP, profil CTD, dan pengambilan sampel zooplankton di Estuari Sungai Musi, Sumatera Selatan.

Pemrosesan ADCP dan Perhitungan MVBS

Nilai intensitas gema (*counts*) dikonversi menjadi MVBS (dB) menggunakan persamaan sonar standar (Mullison, 2017):

$$MBVS = c + 10 \log_{10}(R^2) + 2\alpha R - L_{dbn} - KTEM$$

dengan c adalah kecepatan suara (m s^{-1}); R adalah jarak (*range*) dari transduser ke sel sampel akustik (m); α adalah koefisien absorpsi akustik (dB m^{-1}); L_{dbn} adalah $20\log_{10}$ (intensitas gema/*counts*), yaitu representasi logaritmik dari intensitas gema mentah; dan $KTEM$ adalah konstanta koreksi spesifik instrumen/suhu yang diperoleh dari kalibrasi pabrikan ADCP Sentinel V.

Kecepatan suara dihitung menggunakan persamaan Mackenzie (1981):

$$c = 1448,96 + 4,591T - 5,304 \times 10^{-2} T^2 + 2,374 \times 10^{-4} T^3 + 1,340(S - 35) + 1,630 \times 10^{-2} D + 1,675 \times 10^{-7} D^2 - 1,025 \times 10^{-2} T(S - 35) - 7,139 \times 10^{-13} TD^3$$

Koefisien absorpsi akustik (α) diestimasi menggunakan formulasi Ainslie & McColm (1998). Profil CTD kolom penuh per jam (resolusi 0,5 m) digabungkan dengan data ADCP untuk menghitung koreksi kecepatan suara dan absorpsi spesifik kedalaman pada setiap *bin* dan *ensemble*. Pendekatan koreksi hidrografi yang diselesaikan secara vertikal per-*bin* kedalaman ini menggunakan profil CTD per jam. Metode ini jauh lebih ketat dibandingkan dengan studi ADCP-zooplankton sebelumnya di perairan Indonesia yang umumnya hanya menerapkan koreksi tunggal berbasis kecepatan suara rata-rata kedalaman (Maharani *et al.*, 2024; Napitupulu *et al.*, 2024). Pendekatan ini lebih sesuai untuk estuari dangkal dengan salinitas yang berfluktuasi ekstrem seperti Sungai Musi, sehingga meminimalkan bias sistematis MVBS akibat variasi kecepatan suara vertikal. Nilai MVBS disaring pada rentang -100 hingga -60 dB sebagai representasi hamburan biologis zooplankton dan nekton kecil (Aparna *et al.*, 2022).

Analisis Statistik dan Validasi

Distribusi MVBS divisualisasikan sebagai echogram dan profil vertikal. Untuk validasi biologis, MVBS rata-rata per jam pada *bin* kedalaman terdekat dengan setiap lapisan jaring dibandingkan dengan kelimpahan zooplankton pada waktu dan kedalaman yang sesuai. Korelasi peringkat Spearman dihitung menggunakan fungsi *cor.test* dalam R (R Core Team, 2025) pada kombinasi lapisan-waktu yang memiliki sinyal hambur balik dalam rentang -95 hingga -60 dB ($n = 15$; 3 lapisan $\times$ 5 waktu pada deteksi MVBS yang jelas). Nilai p dievaluasi pada tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$.

Korelasi peringkat Spearman dihitung menggunakan persamaan:

$$\rho = 1 - \left(6 \sum d_i^2 \right) / (n(n^2 - 1))$$

dengan d_i adalah selisih peringkat antara pasangan data MVBS dan kelimpahan zooplankton ke- i , dan n adalah jumlah pasangan observasi ($n = 15$).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Komposisi dan Keanekaragaman Taksonomi Zooplankton

Hasil identifikasi terhadap seluruh sampel jaring menghasilkan 21 taksa dari 5 filum dan 8 kelas, yaitu Copepoda (10 taksa: *Acanthocyclops*, *Calanus*, *Clausocalanus*, *Cyclops*, *Euchaeta*, *Mesocyclops*, *Oithona*, *Paracalanus*, *Thalestridae*, *Tortanidae*), Malacostraca (1 taksa: *Nauplius*), Branchiopoda (1 taksa: *Daphnia*), Maxillopoda (1 taksa: *Aegisthus*), Polychaeta (1 taksa: larva Polychaeta), Bivalvia (1 taksa: larva Bivalvia), Eurotatoria (4 taksa: *Brachionus*, *Conochilus*, *Keratella*, *Ploesoma*), dan Tubulinea (1 taksa: *Diffugia*) (Tabel 1). Copepoda merupakan kelas yang paling dominan pada seluruh lapisan, dengan persentase yang meningkat seiring bertambahnya kedalaman: 56% pada lapisan atas, 68% pada lapisan tengah, dan 78% pada lapisan bawah (Tabel 1; Gambar 2). Taksa *Acanthocyclops* dan *Cyclops* ditemukan pada berbagai interval waktu yang mencakup pagi, siang, dan malam, menunjukkan sebaran temporal yang luas. Pola dominansi Copepoda ini konsisten dengan penelitian di berbagai estuari tropis, di mana Copepoda umumnya menyumbang 50–80% dari total kelimpahan zooplankton (Rosas *et al.*, 2024; Nandy & Mandal, 2020).

Oithona yang termasuk dalam Copepoda kecil ditemukan hampir di seluruh periode, sejalan dengan karakteristiknya sebagai taksa oportunistik yang mampu beradaptasi pada kondisi salinitas yang fluktuatif. Dominansi Copepoda juga berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan hamburan akustik, karena ukuran dan komposisi tubuhnya yang mengandung lipid memberikan hambur balik akustik yang lebih tinggi dibandingkan dengan kelompok holoplankton berukuran kecil lainnya (Aparna *et al.*, 2022).

Kelimpahan dan Pola Distribusi Temporal Zooplankton

Kelimpahan zooplankton bervariasi secara nyata berdasarkan waktu dan lapisan kedalaman yang berbeda (Tabel 2). Pada periode dini hari hingga menjelang siang (02:00–12:00), kelimpahan secara umum rendah dan seragam di seluruh lapisan (167–833 ind m⁻³). Perubahan distribusi yang lebih signifikan mulai terjadi pada periode siang hingga sore hari (14:00–16:00), dengan lapisan bawah mencapai 1.667 ind m⁻³ pada pukul 14:00, diikuti oleh distribusi yang lebih merata antar lapisan pada pukul 16:00 (833–1.000 ind m⁻³). Puncak kelimpahan tercatat pada pukul 18:00, dengan nilai tertinggi pada lapisan tengah sebesar 4.000 ind m⁻³, lapisan atas sebesar 3.500 ind m⁻³, dan lapisan bawah sebesar 2.500 ind m⁻³. Pada pukul 20:00, kelimpahan menurun, namun masih relatif tinggi (1.333–1.833 ind m⁻³) pada seluruh lapisan.

Pola peningkatan tajam kelimpahan pada sore hingga malam hari mengindikasikan migrasi nokturnal zooplankton, yaitu pergerakan dari lapisan perairan yang lebih dalam menuju lapisan yang lebih dangkal pada malam hari, sebagaimana dijelaskan oleh Moniharapon *et al.* (2014). Pola ini juga konsisten dengan mekanisme DVM yang dilaporkan di berbagai ekosistem estuari tropis (Guerra *et al.*, 2019; Potiris *et al.*, 2018). Namun, berbeda dengan DVM amplitudo besar di laut dalam (Maharani *et al.*, 2024; Piton *et al.*, 2025), pergerakan vertikal yang teramati memiliki amplitudo terbatas, mencerminkan kendala fisik pada kolom air dangkal dan pencampuran pasang surut yang kuat.

Tabel 1. Komposisi zooplankton berdasarkan filum, kelas, dan taksa yang ditemukan di Estuari Sungai Musi pada 15 Oktober 2025, serta persentase dominansi pada setiap lapisan kedalaman.

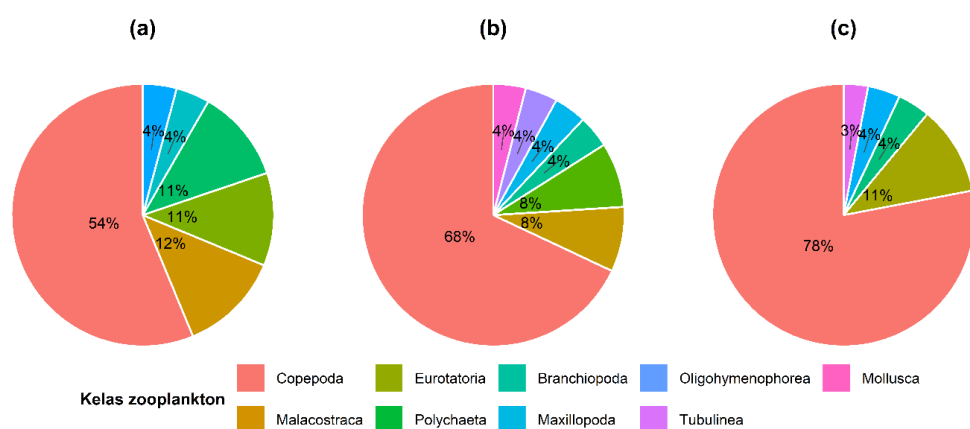
Filum	Kelas	Taksa	Lapisan Atas (%)	Lapisan Tengah (%)	Lapisan Bawah (%)
Arthropoda	Copepoda	Acanthocyclops, Calanus, Clausocalanus, Cyclops, Euchaeta, Mesocyclops, Oithona, Paracalanus, Thalestridae, Tortanidae (10 taksa)	56	68	78
	Malacostraca	Nauplius	12	4	11
	Branchiopoda	Daphnia	0	8	4
	Maxillopoda	Aegisthus	4	0	0
Annelida	Polychaeta	Larva Polychaeta	4	8	0
Mollusca	Bivalvia	Larva Bivalvia	12	0	0
Rotifera	Eurotatoria	Brachionus, Conochilus, Keratella, Ploesoma (4 taksa)	0	8	3
Protozoa	Tubulinea	Diffugia	12	4	4
Jumlah	5 Filum / 8 Kelas	21 Taksa	100	100	100

Indeks Biodiversitas Zooplankton

Indeks keanekaragaman (H'), keseragaman (E'), dan dominansi (C) zooplankton bervariasi nyata berdasarkan waktu dan kedalaman (Tabel 3). Pada periode dini hari (02:00–06:00), seluruh lapisan menunjukkan $H' = 0,00$ dan $C = 1,00$, mengindikasikan hanya satu taksa mendominasi di setiap lapisan dengan tidak ada keanekaragaman. Hal ini sesuai dengan kondisi salinitas rendah (< 3 PSU) pada periode tersebut yang membatasi keanekaragaman komunitas. Peningkatan nilai H' yang nyata terlihat mulai pukul 14:00–16:00, khususnya pada lapisan tengah dan bawah ($H' = 1,01$ – $1,33$, kategori sedang), seiring dengan meningkatnya jumlah taksa yang hadir. Nilai H' tertinggi tercatat pada pukul 18:00–20:00 di seluruh lapisan ($H' = 1,29$ – $1,85$, kategori sedang), didukung oleh nilai keseragaman tinggi ($E' = 0,81$ – $0,95$) dan tidak adanya dominansi tunggal ($C = 0,19$ – $0,29$). Pola peningkatan keanekaragaman sejalan dari sore hingga malam hari ini konsisten dengan kehadiran beberapa taksa Copepoda secara simultan pada lapisan yang lebih dalam pada jam tersebut, termasuk *Nauplius*, *Cyclops*, *Oithona*, *Acanthocyclops*, dan *Calanus*. Peningkatan keanekaragaman ini mencerminkan kondisi lingkungan yang lebih kondusif pada sore hari — kemungkinan didorong oleh intrusi pasang laut yang meningkatkan salinitas, sehingga memungkinkan lebih banyak taksa hadir secara bersamaan di kolom perairan (Nandy & Mandal, 2020; Wong *et al.*, 2022).

Tabel 2. Kelimpahan zooplankton in situ (ind m^{-3}) per lapisan dan waktu pengambilan sampel di stasiun estuari Sungai Musi, 15 Oktober 2025

Waktu (WIB)	Lapisan Atas (ind m^{-3})	Lapisan Tengah (ind m^{-3})	Lapisan Bawah (ind m^{-3})
02:00	333	167	167
04:00	167	167	500
06:00	167	167	167
08:00	333	167	167
10:00	167	167	500
12:00	333	167	833
14:00	167	667	1.667
16:00	833	1.000	833
18:00	3.500	4.000	2.500
20:00	1.833	1.667	1.333



Gambar 2. Komposisi zooplankton berdasarkan kelas pada tiga lapisan kedalaman di Estuari Sungai Musi: (a) lapisan atas, (b) lapisan tengah, dan (c) lapisan bawah. Copepoda mendominasi di seluruh lapisan dengan persentase yang meningkat seiring dengan pertambahan kedalaman.

Karakteristik MVBS dan Distribusi Vertikal Hambur Balik

MVBS yang diturunkan dari intensitas gema ADCP 492 kHz menunjukkan kisaran -211 hingga -3 dB (median -153 dB; rata-rata -143 dB). Statistik ringkasan MVBS dan intensitas gema disajikan pada Tabel 4. Kecepatan suara yang diestimasi dari profil T-S lapangan bervariasi antara 1.508 dan 1.538 m s $^{-1}$, dan koefisien absorpsi akustik rata-rata $\approx 2,6$ dB m $^{-1}$ — konsisten dengan transisi dari air hampir tawar pada dini hari menjadi air payau-laut pada sore hari. Variasi kecepatan suara dan absorpsi yang terselesaikan secara vertikal per-bin kedalaman ini merupakan aspek kritis dalam koreksi MVBS di estuari dangkal bersalinitas dinamis, karena kesalahan koreksi dapat menyebabkan bias sistematis pada estimasi MVBS hingga beberapa dB (Mackenzie, 1981; Ainslie & McColm, 1998).

Dari 7.700 sel total, sebanyak 332 titik data berada dalam rentang MVBS -100 hingga -60 dB dan diinterpretasikan sebagai hambur balik biologis. Perlu dicatat bahwa ambang MVBS -100 hingga -60 dB yang digunakan merujuk pada studi ADCP sebelumnya di perairan tropis Indonesia (Aparna *et al.*, 2022; Napitupulu *et al.*, 2024); meskipun kontribusi sedimen tersuspensi tidak dapat sepenuhnya dikesampingkan di perairan keruh seperti Sungai Musi, konfirmasi empiris dari validasi zooplankton menunjukkan bahwa sinyal biologis mendominasi rentang tersebut. Profil vertikal (Gambar 4; Tabel 5) menunjukkan lapisan hamburan pertengahan kolom air yang persisten antara $6,5$ dan 9 m, dengan jumlah deteksi tertinggi pada kedalaman 9 m (*bin* 17: N = 60, MVBS rata-rata = -76 dB). Lapisan ini berimpit dengan zona MVBS sedang hingga tinggi yang juga menjadi posisi vertikal lapisan bawah pengambilan sampel jaring (kedalaman efektif $4,32$ – $7,28$ m), di mana kelimpahan zooplankton meningkat secara signifikan mulai pukul 14:00

Tabel 3. Indeks biodiversitas zooplankton (keanekaragaman H', keseragaman E', dominansi C) per lapisan dan waktu pengambilan sampel di Estuari Sungai Musi.

Waktu	Kedalaman (m)	H'	Kriteria	E'	Kriteria	C	Kriteria
02:00	1,08	0,00	Rendah	0,00	Rendah	1,00	Dominansi
	2,16	0,00	Rendah	0,00	Rendah	1,00	Dominansi
	4,32	0,00	Rendah	0,00	Rendah	1,00	Dominansi
08:00	1,14	0,69	Rendah	1,00	Tinggi	0,50	Tidak Dominan
	2,28	0,00	Rendah	0,00	Rendah	1,00	Dominansi
	4,56	0,00	Rendah	0,00	Rendah	1,00	Dominansi
14:00	1,46	0,00	Rendah	0,00	Rendah	1,00	Dominansi
	2,92	1,04	Sedang	0,95	Tinggi	0,38	Tidak Dominan
	5,84	0,50	Rendah	0,72	Tinggi	0,68	Dominansi
16:00	1,82	0,95	Rendah	0,86	Tinggi	0,44	Tidak Dominan
	3,64	1,01	Sedang	0,92	Tinggi	0,39	Tidak Dominan
	7,28	1,33	Sedang	0,96	Tinggi	0,28	Tidak Dominan
18:00	1,64	1,74	Sedang	0,89	Tinggi	0,21	Tidak Dominan
	3,28	1,67	Sedang	0,81	Tinggi	0,26	Tidak Dominan
	6,56	1,32	Sedang	0,95	Tinggi	0,28	Tidak Dominan.
20:00	1,50	1,85	Sedang	0,95	Tinggi	0,69	Dominansi
	3,00	1,29	Sedang	0,93	Tinggi	0,29	Tidak Dominan
	6,00	1,83	Sedang	0,94	Tinggi	0,19	Tidak Dominan

Variabilitas Temporal Hambur Balik dan Kaitannya dengan Keanekaragaman

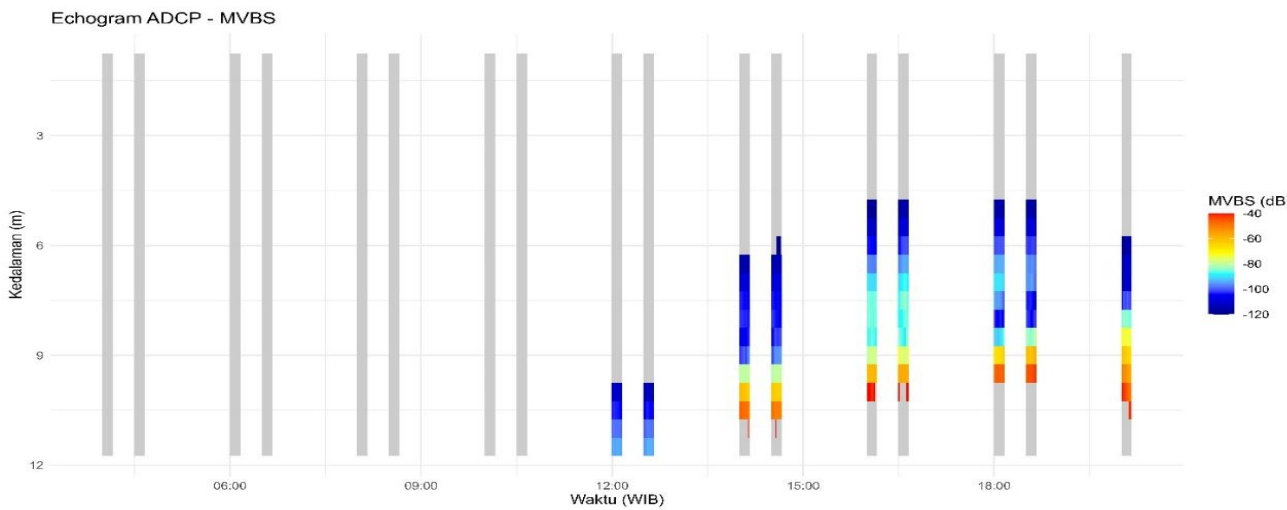
Deret waktu deteksi per menit menunjukkan puncak pada pukul 16:00–16:39 WIB (N = 6 per menit; MVBS rata-rata ≈ −86 hingga −85 dB; kedalaman rata-rata stabil pada 7,75 m) (Tabel 6). Intensifikasi hambur balik pada sore hari ini bersamaan dengan peningkatan keanekaragaman (H' meningkat dari 0,00–0,69 pada pagi hari menjadi 1,01–1,33 pada pukul 16:00) dan penurunan dominansi (C turun dari 1,00 menjadi 0,28–0,44), yang mengindikasikan komunitas zooplankton yang lebih beragam dan tersebar di lapisan pertengahan. Peningkatan MVBS mendahului puncak kelimpahan sekitar 2 jam, pada pukul 18:00, menunjukkan bahwa ADCP mampu mendeteksi akumulasi komunitas pada tahap awal sebelum puncak kelimpahan numerik terjadi.

Tabel 4. Statistik ringkasan intensitas gema (EI) dan MVBS dari ADCP 492 kHz di stasiun estuari pada 15 Oktober 2025

Parameter	Satuan	Min	Q1	Median	Rata-rata	Q3	Maks
EI	counts	71	119	159	149	176	234
MVBS	dB	−210,8	−182,2	−152,8	−143,2	−115,0	−2,7

Tabel 5. MVBS rata-rata, simpangan baku, intensitas gema rata-rata, dan jumlah deteksi zooplankton per bin kedalaman (MVBS −100 hingga −60 dB).

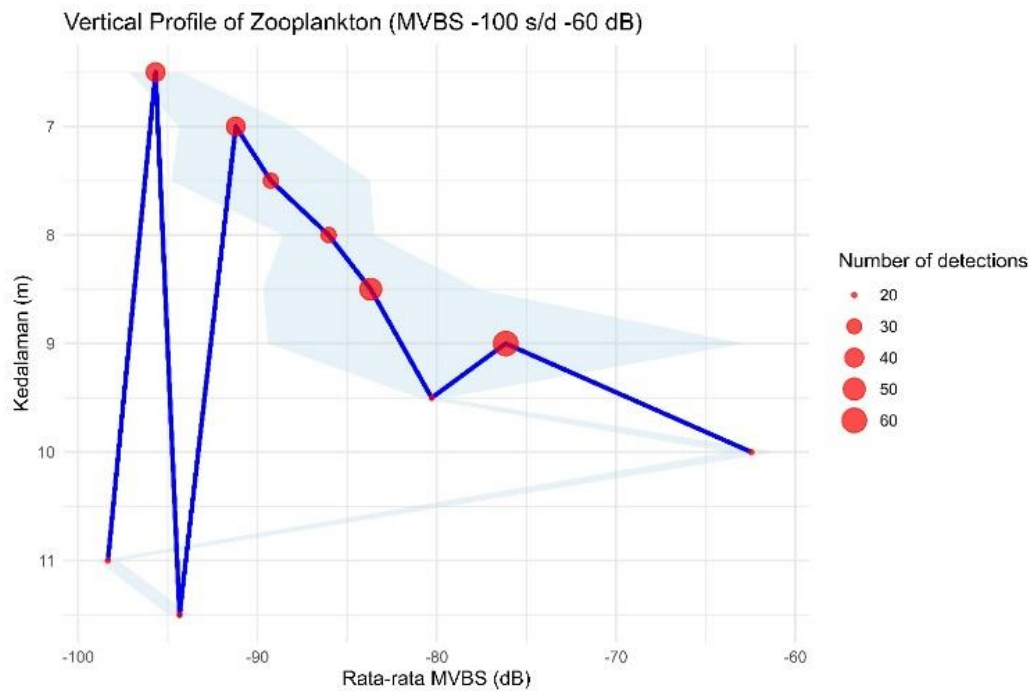
Kedalaman (m)	Bin	MVBS rata-rata (dB)	SD MVBS (dB)	EI rata-rata (jumlah)	N deteksi
6,5	12	−95,7	1,5	147	40
7,0	13	−91,2	3,2	151	40
7,5	14	−89,3	5,5	161	31
8,0	15	−86,0	2,5	165	31
8,5	16	−83,7	6,0	173	50
9,0	17	−76,2	13,2	162	60



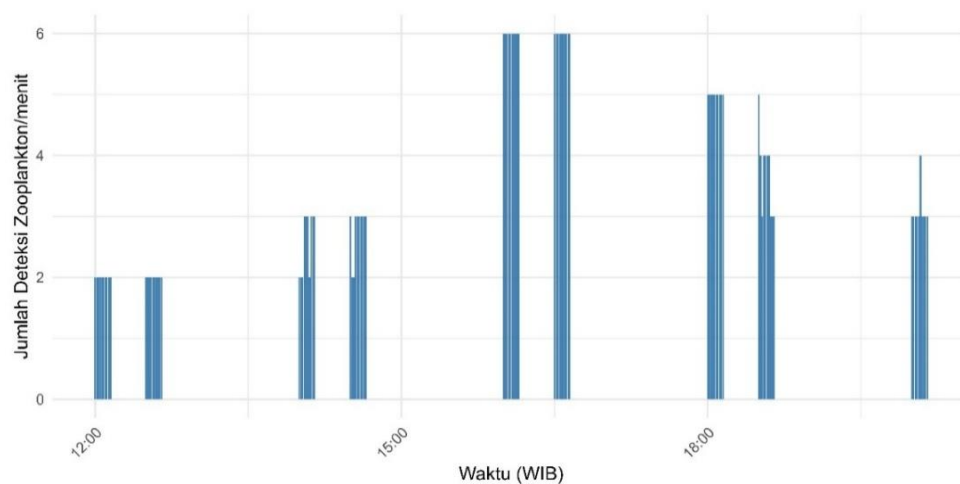
Gambar 3. Echogram MVBS ADCP 492 kHz (03:00–20:09 WIB, 15 Oktober 2025). Skala warna: −120 hingga −40 dB; kuning–merah = MVBS tinggi. Lapisan hamburan pertengahan (6–10 m) terlihat persisten dengan intensifikasi pada sore hari.

Tabel 6. MVBS rata-rata, kedalaman rata-rata dan median, serta jumlah deteksi pada interval waktu dengan deteksi tertinggi (N = 6 per menit).

Jam	Interval menit	MVBS rata-rata (dB)	Kedalaman rata-rata (m)	Median (m)	N
16	00–09	–87 hingga –86	7,75	7,75	6 per menit
16	30–39	–87 hingga –85	7,75	7,75	6 per menit



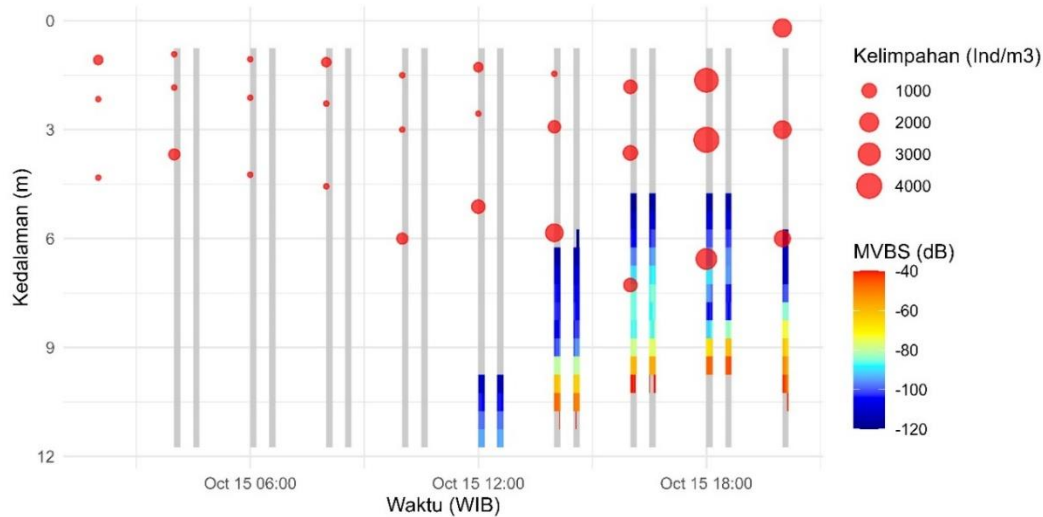
Gambar 4. Profil vertikal MVBS rata-rata (garis) $\pm$ SD (arsiran) untuk sel MVBS –100 hingga –60 dB. Simbol merah = jumlah deteksi (N); ukuran proporsional terhadap N. Maksimum pada 9 m; lapisan hamburan kuat di 6,5–8,5 m.



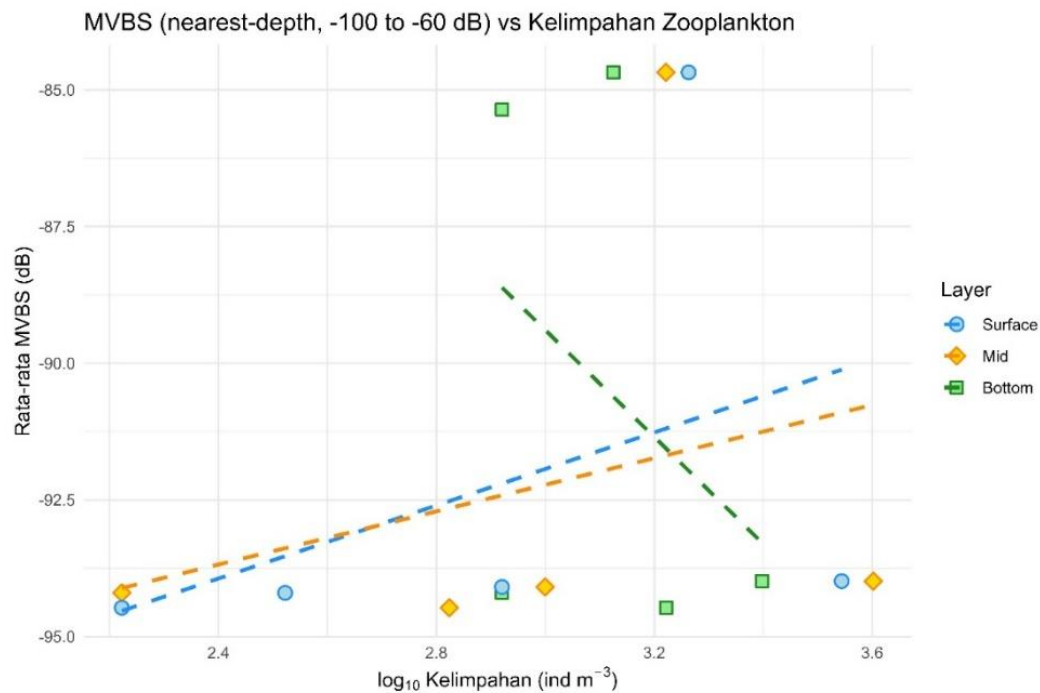
Gambar 5. Deret waktu jumlah deteksi zooplankton (N per menit) berdasarkan MVBS –100 hingga –60 dB. Puncak deteksi pada 16:00–16:39 WIB.

Validasi MVBS terhadap Kelimpahan In Situ dan Analisis Korelasi

Tumpang tindih (*overlay*) titik kelimpahan jaring pada *echogram* MVBS (Gambar 6) menunjukkan kesesuaian spatiotemporal yang kuat: titik kelimpahan tinggi ($\geq 2.000 \text{ ind m}^{-3}$) pada 18:00–20:00 di kedalaman 3–7 m berimpit dengan zona MVBS sedang hingga tinggi (-95 hingga -76 dB) di lapisan hamburan 6,5–9 m. Sebaliknya, titik kelimpahan rendah ($< 500 \text{ ind m}^{-3}$) pada 02:00–10:00 berada di wilayah MVBS yang rendah.



Gambar 6. Echogram MVBS ADPC 492 kHz dioverlay dengan titik kelimpahan zooplankton in situ (simbol merah, ukuran proporsional terhadap kelimpahan). Kelimpahan tinggi ($\geq 2.000 \text{ ind m}^{-3}$) berimpit dengan zona MVBS tinggi pada 18:00–20:00 dan kedalaman 3–7 m.



Gambar 7. Diagram pencar MVBS rata-rata (dB) versus $\log_{10}$ kelimpahan zooplankton (ind m^{-3}) di Estuari Sungai Musi

Korelasi Spearman berdasarkan 15 pasang observasi (konfigurasi *nearest-depth*, MVBS -100 hingga -60 dB) menghasilkan $\rho \approx 0,57$ dengan $p < 0,05$, yang menunjukkan hubungan positif moderat antara MVBS dan kelimpahan zooplankton pada seluruh strata kedalaman, meskipun dengan penyebaran yang cukup besar. Lapisan permukaan dan tengah cenderung menunjukkan korelasi positif (MVBS sedikit meningkat seiring peningkatan $\log_{10}$ kelimpahan), sedangkan lapisan bawah memperlihatkan kecenderungan korelasi lemah atau bahkan negatif, yang mengindikasikan bahwa sinyal backscatter di dekat dasar dipengaruhi oleh faktor non-biotik atau noise latar. Nilai korelasi yang hanya moderate ini mencerminkan kombinasi beberapa faktor: (1) struktur komunitas zooplankton yang heterogen dan didominasi Copepoda, tetapi dengan kontribusi takson kecil yang menghasilkan respons akustik berbeda; (2) keterbatasan rentang MVBS yang relatif sempit pada frekuensi 492 kHz di perairan estuari yang keruh; dan (3) ukuran sampel yang kecil serta ketidakpastian spasial antara lokasi sel ADCP dan titik pengambilan sampel net. Secara keseluruhan, Gambar 7 mendukung kesimpulan bahwa MVBS ADCP di Estuari Musi lebih kuat sebagai indikator pola vertikal dan temporal (misalnya lapisan hamburan menengah dan intensifikasi sore-malam) daripada sebagai estimator kuantitatif langsung kelimpahan zooplankton, dan hubungan MVBS-kelimpahan sangat bergantung pada kedalaman lapisan. Nilai korelasi yang tidak terlalu kuat ini juga kemungkinan dipengaruhi oleh kovariasi temporal: baik MVBS maupun kelimpahan cenderung meningkat secara bersamaan pada sore hari sebagai respons terhadap faktor lingkungan yang sama (misalnya siklus cahaya dan intrusi air pasang yang meningkatkan salinitas). Untuk membedakan komponen hubungan langsung MVBS-kelimpahan dari efek kovariasi temporal dan hidrografi, diperlukan analisis residual atau pendekatan korelasi parsial/regresi parsial dalam penelitian lanjutan dengan ukuran sampel yang lebih besar dan rancangan pengamatan yang lebih terkontrol secara spasial-temporal.

Kaitan Komposisi Zooplankton dengan Hamburan Akustik

Dominansi Copepoda (56–78%) pada seluruh lapisan memiliki implikasi langsung terhadap interpretasi MVBS. Copepoda — terutama taksa seperti *Acanthocyclops*, *Cyclops*, dan *Oithona* — memiliki kandungan lipid yang relatif tinggi dan struktur tubuh yang menghasilkan kontras impedansi akustik yang cukup besar terhadap air laut, sehingga menjadi sumber hambur balik akustik yang dominan pada rentang frekuensi ratusan kHz (Aparna *et al.*, 2022; Liu & Tang, 2024). Kehadiran *Nauplius* (larva Copepoda) pada pukul 16:00–20:00 di lapisan tengah juga berkontribusi terhadap peningkatan hambur balik, meskipun kontribusi individu lebih rendah karena ukurannya yang kecil. Rotifera (*Brachionus*, *Keratella*) yang ditemukan dalam jumlah kecil pada sore hari memiliki kontribusi hamburan minimal karena ukuran tubuhnya yang sangat kecil dan tidak adanya struktur keras yang signifikan.

Keberadaan kelompok meroplankton (larva *Polychaeta* dan larva Bivalvia) dalam jumlah yang terbatas (< 8% di lapisan atas dan tengah) menunjukkan bahwa kontribusinya terhadap MVBS bersifat minor, konsisten dengan karakteristik estuari pada awal musim hujan dengan salinitas rendah yang membatasi kehadiran meroplankton laut (Rosas *et al.*, 2024). *Daphnia* — yang hanya ditemukan pada malam hari di lapisan lebih dalam — mungkin berkontribusi terhadap sebagian peningkatan MVBS di lapisan bawah pada pukul 18:00–20:00, mengingat karakteristik tubuhnya yang relatif besar untuk ukuran zooplankton non-Copepoda. Dengan demikian, hambur balik ADCP dapat digunakan sebagai indikator keberadaan dan pola vertikal/temporal zooplankton di Estuari Musi, yang didukung oleh komposisi zooplankton yang didominasi Copepoda; namun demikian, sebagaimana ditunjukkan oleh analisis korelasi, hubungan kuantitatif antara MVBS dan kelimpahan tidak selalu kuat pada setiap lapisan kedalaman.

Beberapa keterbatasan perlu diakui secara eksplisit. Pertama, penelitian ini hanya mencakup satu stasiun tunggal dan satu hari observasi, sehingga temuan belum dapat mewakili variabilitas spasial di sepanjang gradien estuari Sungai Musi maupun variabilitas temporal antar siklus perbani-purnama atau antar musim. Kedua, meskipun ambang MVBS -100 hingga -60 dB didasarkan pada literatur untuk aplikasi ADCP berfrekuensi tinggi (Aparna *et al.*, 2022; Napitupulu *et al.*, 2024), ambang ini belum dikalibrasi secara independen untuk komunitas spesifik Copepoda di estuari dangkal yang turbulen ini — kontribusi partikel tersuspensi (sedimen, detritus) terhadap MVBS dalam rentang tersebut belum dapat sepenuhnya dikesampingkan. Ketiga, sebagaimana dibahas di atas, korelasi Spearman yang berskala sedang ($\rho \approx 0,57$; $p < 0,05$) sebagian besar mencerminkan kovariasi temporal antara MVBS dan kelimpahan, sehingga tidak dapat langsung ditafsirkan sebagai hubungan akustik-biologis yang sepenuhnya bebas dari confounding. Keempat, identifikasi taksonomi dilakukan hingga tingkat kelas dan genus, sehingga variasi pada tingkat spesies yang

dapat memengaruhi hambur balik akustik (melalui perbedaan ukuran dan kandungan lipid) belum dapat dianalisis. Keterbatasan-keterbatasan ini menekankan perlunya studi lanjutan multistasiun dan multimusim dengan kalibrasi akustik yang lebih rinci serta resolusi taksonomi yang lebih tinggi, disertai analisis residual atau korelasi parsial untuk memisahkan komponen hubungan langsung MVBS–kelimpahan dari efek kovariasi temporal dan faktor hidrografi, guna memperkuat inferensi ekologis di Estuari Musi

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa hambur balik ADCP 492 kHz yang dikoreksi secara hidrografi per kedalaman mampu mendeteksi pola vertikal dan temporal distribusi zooplankton di estuari tropis dangkal yang dinamis. Identifikasi jaring mengungkapkan 21 taksa dari 5 filum, dengan Copepoda sebagai kelompok dominan (56–78%) pada seluruh lapisan kedalaman — komposisi yang mendukung interpretasi bahwa sinyal akustik merefleksikan keberadaan zooplankton sebagai proksi biologis. Lapisan hamburan pertengahan yang persisten pada kedalaman sekitar 6,5–9 m dan intensifikasi hambur balik pada sore hari berimpit dengan peningkatan kelimpahan zooplankton (hingga $\pm 4.000 \text{ ind m}^{-3}$) dan keanekaragaman sedang ($H' \approx 1,3\text{--}1,7$) pada pukul 18:00–20:00 WIB, yang secara bersama-sama menunjukkan adanya migrasi vertikal nokturnal dengan amplitudo terbatas di kolom air yang dangkal. Analisis korelasi peringkat Spearman menunjukkan hubungan positif moderat antara MVBS dan $\log_{10}$ kelimpahan pada skala gabungan, dengan kekuatan hubungan yang bergantung pada lapisan: lapisan permukaan dan tengah memperlihatkan kecenderungan korelasi positif, sedangkan lapisan bawah menunjukkan korelasi lemah atau bahkan negatif, yang mengindikasikan bahwa sinyal MVBS di dekat dasar lebih dipengaruhi oleh faktor non-biotik dan noise latar dibandingkan variasi kelimpahan zooplankton. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa MVBS ADCP di perairan estuari lebih kuat sebagai indikator pola vertikal dan temporal distribusi zooplankton daripada sebagai estimator kuantitatif langsung kelimpahan, serta bahwa hubungan MVBS–kelimpahan sangat bergantung pada komposisi komunitas dan lapisan kedalaman. Penelitian lanjutan perlu memperluas cakupan spasial ke beberapa stasiun di sepanjang gradien estuari, memperpanjang durasi pengamatan sehingga mencakup siklus purnama–perbani dan kontras musim hujan–kemarau, serta mengintegrasikan informasi ukuran tubuh dan fraksi spesies zooplankton ke dalam pemodelan akustik. Pendekatan tersebut akan memungkinkan hubungan kuantitatif yang lebih halus antara karakteristik komunitas dan hambur balik akustik, serta pemisahan yang lebih jelas antara sinyal yang bersumber dari zooplankton dan partikel non-biotik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung oleh Universitas Sriwijaya melalui Surat Keputusan Nomor 0028/UN9/SK.LPPM.PT/2025 dan Kontrak Penelitian Nomor 0108.155/UN9/SB3.LPPM.PT/2025. Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim lapangan atas kontribusinya dalam pengumpulan data ADCP, CTD, dan zooplankton di Estuari Sungai Musi, serta kepada laboran yang melaksanakan identifikasi zooplankton.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, A., Pratomo, D. G., & Khomsin. 2025. Plankton Distribution Analysis with Underwater Acoustic Remote Sensing. *BIO Web of Conferences*, 157: 07008. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202515707008>
- Ainslie, M. A., & McColm, J. G. 1998. A Simplified Formula for Viscous and Chemical Absorption in Sea Water. *Journal of the Acoustical Society of America*, 103(3): 1671–1672.
- Aparna, S. G., Desai, D. V., Shankar, D., Anil, A. C., Dora, S., & Khedekar, R. 2022. Seasonal Cycle of Zooplankton Standing Stock Inferred from ADCP Backscatter Measurements in the Eastern Arabian Sea. *Progress in Oceanography*, 203: 102766.
- Bandara, K., Varpe, Ø., Wijewardene, L., Tverberg, V., & Eiane, K. 2021. Two Hundred Years of Zooplankton Vertical Migration Research. *Biological Reviews*, 96(4): 1547–1589.
- Bharathi, M. D., Venkataramana, V., & Sarma, V. V. S. S. 2022. Phytoplankton Community Structure Is Governed by Salinity Gradient and Nutrient Composition in the Tropical Estuarine System. *Continental Shelf Research*, 234: 104643.
- Burford, M. A., & Faggotter, S. J. 2021. Comparing the Importance of Freshwater Flows Driving Primary Production in Three Tropical Estuaries. *Marine Pollution Bulletin*, 169: 112565.
- Cisewski, B., & Strass, V. H. 2016. Acoustic Insights into the Zooplankton Dynamics of the Eastern Weddell Sea. *Progress in Oceanography*, 144: 62–92.

- Cisewski, B., Hátún, H., Kristiansen, I., Hansen, B., Larsen, K. M. H., Eliassen, S. K., & Jacobsen, J. A. 2021. Vertical Migration of Pelagic and Mesopelagic Scatterers from ADCP Backscatter Data in the Southern Norwegian Sea. *Frontiers in Marine Science*, 7: 542386.
- Conway, D. V. P., White, R. G., Hugues-Dit-Ciles, J., Gallienne, C. P., & Robins, D. B. 2003. Guide to the Coastal and Surface Zooplankton of the South-Western Indian Ocean. *Occasional Publication of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 15: 1–354.
- Dwinovantyo, A., Manik, H. M., Prartono, T., & Susilohadi, S. 2017. Quantification and Analysis of Suspended Sediments Concentration Using Mobile and Static Acoustic Doppler Current Profiler Instruments. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2017: 4890421.
- Dwinovantyo, A., Manik, H. M., Prartono, T., & Susilohadi. 2018. Application of Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) to Observe Diel Vertical Migration of Zooplankton. *Journal of Physics: Conference Series*, 1075(1): 012016.
- Gjøsæter, H., Wiebe, P. H., Knutsen, T., & Ingvaldsen, R. B. 2017. Evidence of Diel Vertical Migration of Mesopelagic Sound-Scattering Organisms in the Arctic. *Frontiers in Marine Science*, 4: 332.
- Guerra, D., Schroeder, K., Borghini, M., Camatti, E., Pansera, M., Schroeder, A., Sparnocchia, S., & Chiggiato, J. 2019. Zooplankton Diel Vertical Migration in the Corsica Channel (North-Western Mediterranean Sea) Detected by a Moored Acoustic Doppler Current Profiler. *Ocean Science*, 15(3): 631–649.
- Heltria, S., Surbakti, H., & Purwanto, A. D. 2021. Turbidity Front Dynamics of the Musi Banyuasin Estuary Using Numerical Model and Landsat 8 Satellite. *AACL Bioflux*, 14(1): 238–252.
- Howe, B. M., Miksis-Olds, J., Rehm, E., Sagen, H., Worcester, P. F., & Haralabus, G. 2019. Observing the Oceans Acoustically. *Frontiers in Marine Science*, 6: 426.
- Liu, J., & Tang, Y. 2024. Monitoring Two Typical Marine Zooplankton Species Using Acoustic Methods in the South China Sea. *Sensors*, 24(15): 4827.
- Mackenzie, K. V. 1981. Nine-Term Equation for Sound Speed in the Oceans. *Journal of the Acoustical Society of America*, 70(3): 807–812.
- Maharani, G. R., Pujiyati, S., Solikin, S., Jaya, I., Adrianto, D., Mulyadi, D. S., & Dwinovantyo, A. 2024. Exploring Diel Vertical Migration and Spatiotemporal Variation of Zooplankton Backscattering Strength Using an Acoustic Doppler Current Profiler Instrument in the Halmahera Sea, Indonesia. *Archives of Biological Sciences*, 76(1): 55–67.
- Moniharapon, A. D., Tetelepta, J. M. S., & Huliselan, H. A. 2014. Distribusi Vertikal dan Horizontal Zooplankton di Teluk Ambon Dalam. *Jurnal Triton*, 10(1): 1–10.
- Mullison, J. 2017. Backscatter Estimation Using Broadband Acoustic Doppler Current Profilers — Updated. In *Proceedings of ASCE Hydraulic Measurements & Experimental Methods Conference*, Durham, North Carolina (pp. 1–8).
- Nandy, T., & Mandal, S. 2020. Unravelling the Spatio-Temporal Variation of Zooplankton Community from the River Matla in the Sundarbans Estuarine System, India. *Oceanologia*, 62(3): 339–357.
- Napitupulu, G., Farihah, R. A., Manik, H. M., Larasati, O. D. D., Napitupulu, M., Bernawis, L. I., Radjawane, I. M., & Kusmanto, E. 2024. Zooplankton Distribution from Backscatter Data of ADCP Instrument in West Sumatra Waters. *Bulletin of the Marine Geology*, 39(2): 115–128.
- Odum, E. P. 1993. Dasar-Dasar Ekologi (Edisi 3). Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Odum, E. P. 1996. Fundamentals of Ecology (3rd ed.). Philadelphia: W. B. Saunders.
- Piton, V., Reiss, R., Lemmin, U., Anneville, O., Many, G., Keller, J., Kindschi, V., Wynn, H. K., Rasconi, S., Laine, L., & Barry, D. A. 2025. Identifying and Quantifying Unexpected Deep Zooplankton Diel Vertical Migration in a Large Deep Lake. *Limnology and Oceanography*, 70(1): 45–62.
- Potiris, E., Frangoulis, C., Kalampokis, A., Ntoumas, M., Pettas, M., Petihakis, G., & Zervakis, V. 2018. Acoustic Doppler Current Profiler Observations of Migration Patterns of Zooplankton in the Cretan Sea. *Ocean Science*, 14(4): 783–800.
- R Core Team. 2025. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.
- Rosas, R. S., Azevedo-Cutrim, A. C. G., Cutrim, M. V. J., da Cruz, Q. S., Souza, D. S. C., dos Santos Sá, A. K. D., Oliveira, A. V. G., & Santos, T. P. 2024. Spatial Heterogeneity of Zooplankton Community in an Eutrophicated Tropical Estuary. *Aquatic Sciences*, 86(2): 44.

-
- Thorp, J. H., & Covich, A. P. 2010. Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates (3rd ed.). Burlington: Academic Press.
- Tong, J., Tang, Y., & Mukai, T. 2025. Underwater Acoustic Technologies for Sustainable Fisheries. *Fishes*, 10(10): 497.
- Wickstead, J. H. 1965. An Introduction to the Study of Tropical Plankton. London: Hutchinson Tropical Monographs.
- Wong, E., Yau, C., & Chan, K. Y. K. 2022. Seasonal and Spatial Dynamics of Mesozooplankton Community in a Subtropical Embayment. *Regional Studies in Marine Science*, 56: 102724.