

Akumulasi Logam Tembaga (Cu) dan Seng (Zn) pada Cacing *Diopatra clapedii* sebagai Bioindikator Pencemaran di Perairan Donan, Cilacap

Accumulation of Copper (Cu) and Zinc (Zn) in The Worm Diopatra clapedii as A Bioindicator of Pollution in Donan Waters, Cilacap

Maya Fatmawati Rahayu^{1*}, Sri Lestari², Joko Pamungkas³

¹ Program Studi Biologi Magister Fakultas Biologi Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto, Indonesia

² Laboratorium Ekotoksikologi Fakultas Biologi Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto, Indonesia

³ Laboratorium Geodiversitas, Badan Riset dan Inovasi Nasional

*corresponding author, Email: mayafatmawati091@gmail.com

Rekam Jejak Artikel:

Diterima : 21/12/2025

Disetujui : 30/06/2026

Abstract

Donan waters, Cilacap, is an estuary susceptible to heavy metal pollution (Cu and Zn) due to intensive industrial and domestic activities. This study aims to assess the dynamics of Cu and Zn accumulation in environmental compartments (water and sediment) and its potential on the macrozoobenthos *Diopatra clapedii* as a bioindicator. A survey method was employed, involving the sampling of water, sediment, and worms at several observation stations. Total metal concentrations were measured using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) and analyzed using Pearson correlation. The results indicate that sediment acts as the primary sink, with a significant positive correlation between metal concentrations in water and sediment ($R=0.45$; $p=0.0059$). Heavy metal bioaccumulation in *D. clapedii* showed a very strong positive correlation with sediment concentrations ($R=0.81$; $p=2.4e-09$), confirming sediment as the main exposure pathway. Nevertheless, the correlation with water was also significant ($R=0.50$; $p=0.0018$), suggesting a secondary exposure route. Conclusion: *Diopatra clapedii* is proven to be a highly effective and valid bioindicator for Cu and Zn heavy metal pollution in Donan waters due to its ability to accurately reflect contamination levels in both environmental compartments, particularly the sediment.

Key Words : Accumulation, Bioindicator, *Diopatra clapedii*, Heavy Metal, Sediment

Abstrak

Perairan Donan, Cilacap, merupakan estuari yang rentan terhadap pencemaran logam berat (Cu dan Zn) akibat intensitas kegiatan industri dan domestik. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji dinamika akumulasi logam Cu dan Zn pada kompartemen lingkungan (air dan sedimen) serta potensinya pada makrozoobentos *Diopatra clapedii* sebagai bioindikator. Metode survei digunakan dengan pengambilan sampel air, sedimen, dan cacing pada beberapa stasiun pengamatan. Konsentrasi total logam diukur menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) dan dianalisis menggunakan spearmani. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sedimen bertindak sebagai penampung utama, dengan korelasi positif yang signifikan antara konsentrasi logam di air dan sedimen ($R=0,63$; $p=0,0011$). Bioakumulasi logam berat pada *D. clapedii* sangat kuat dan positif berkorelasi dengan konsentrasi pada sedimen ($R=0,66$; $p=0,00049$), menegaskan sedimen sebagai jalur paparan utama. Meskipun demikian, korelasi dengan air juga signifikan ($R=0,47$; $p=0,02$), menunjukkan adanya jalur paparan sekunder. Kesimpulan: Cacing *Diopatra clapedii* terbukti sangat efektif dan valid sebagai bioindikator pencemaran logam Cu dan Zn di Perairan Donan karena kemampuannya secara akurat merefleksikan tingkat kontaminasi di kedua kompartemen lingkungan, khususnya sedimen.

Kata kunci : Akumulasi, Bioindikator, *Diopatra clapedii*, Logam Berat, Sedimen

PENDAHULUAN

Perairan estuari Donan di Kabupaten Cilacap, Jawa Tengah, memiliki peran ekologis dan ekonomis yang penting, namun kawasan ini secara terus-menerus menerima masukan limbah dari aktivitas padat industri seperti kilang minyak, dan pabrik semen (Mukti *et al.*, 2021). Masukan limbah tersebut membawa berbagai jenis polutan, termasuk logam berat tembaga (Cu) dan seng (Zn), yang dapat bersifat toksik pada konsentrasi tinggi. Logam berat memiliki sifat sulit terdegradasi dan cenderung terakumulasi, terutama pada sedimen dasar perairan, yang dapat

memicu risiko pencemaran kronis dan ancaman terhadap kesehatan biota dan manusia melalui rantai makanan (Darmono, 2001; Rudiyan, 2021).

Pemantauan kualitas perairan secara kimiawi (analisis air dan sedimen) seringkali hanya memberikan gambaran sesaat (*snapshot*) mengenai kondisi pencemaran. Oleh karena itu, pendekatan biologis melalui penggunaan bioindikator menjadi metode yang lebih efektif karena mampu merefleksikan tingkat paparan dan efek biologis polutan dalam jangka waktu yang lebih panjang

(Hawkes, 1979). Salah satu kelompok biota yang potensial adalah makrozoobentos.

Cacing Polychaeta dari spesies *Diopatra clapedii*, merupakan makrozoobentos yang melimpah dan menetap di dasar perairan Donan (Pamungkas, *et.al.*, 2023). Cacing tersebut secara langsung terpapar polutan yang ada pada sedimen. Karakteristik *sessile* (hidup menetap) dan kemampuan mengakumulasi logam berat menjadikan *D. clapedii* sebagai berpotensi sebagai bioindikator (Lestari *et al.*, 2025). Penelitian sebelumnya di kawasan Segara Anakan dan Perairan Donan telah mengidentifikasi sejumlah biota lokal yang berpotensi sebagai bioindikator (Lestari dan Rohmanrto, 2020), namun kajian komprehensif yang membandingkan secara kuantitatif dinamika korelasi akumulasi logam Cu dan Zn dari ketiga media (air, sedimen, dan cacing) pada *D. clapedii* masih terbatas. Novelty penelitian terletak pada pengembangan *D. clapedii* sebagai bioindicator pencemaran logam berat melalui analisis kuantitatif dan komprehensif hubungan akumulasi Cu dan Zn pada cacing dengan konsentrasinya di air dan sedimen.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk (1) menguji kandungan logam berat Cu dan Zn di air, sedimen dan tubuh *D. clapedii*, (2) menganalisis korelasi kandungan logam berat yang ada di air, sedimen dan tubuh *D. clapedii*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah bagi ilmu Ekotoksikologi dan menjadi dasar kebijakan dalam program biomonitoring lingkungan pesisir di Indonesia.

MATERI DAN METODE

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Perairan Donan, Kecamatan Cilacap Tengah, Kabupaten Cilacap, Jawa Tengah pada bulan Oktober- November 2024. Penentuan lokasi sampling dilakukan secara purposive berdasarkan rona lingkungan dan

keberadaan *D. clapedii*. Empat stasiun pengambilan sampel ditetapkan, yaitu Stasiun 1 (Desa Tritih), Stasiun 2 (Desa Karangtalun), Stasiun 3 (Desa Lomanis), dan Stasiun 4 (Desa Donan) (Gambar1).

Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel dilakukan sebanyak tiga kali ulangan dengan interval dua minggu antar ulangan. Sampel yang dikumpulkan meliputi: (1) air permukaan sebanyak 1 L, (2) sedimen sebanyak 1 kg secara komposit, dan (3) cacing *D. clapedii* yang diambil dari tabung-tabung di substrat dasar. Semua sampel disimpan dalam coolbox dan dibawa ke laboratorium untuk analisis lebih lanjut.

Analisis Sampel

Sampel air dilakukan dengan pengambilan 10 mL sampel, penambahan larutan Metil Isobutil Keton (MIBK), dan pemanasan pada suhu 80°C hingga jernih. Sampel sedimen dikeringkan, dihaluskan, dan ditimbang 20 g, kemudian ditambahkan akuades, HNO₃ pekat, dan HCl sebelum dipanaskan. Sampel cacing dicincang, ditimbang 5 g, dan didestruksi menggunakan HNO₃ pekat dan H₂O₂ pada 80°C. Semua filtrat dianalisis menggunakan Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) untuk mengukur konsentrasi Cu dan Zn sesuai dengan standar SNI 6989.8:2009 (BSN, 2009). Parameter lingkungan yang telah dilakukan meliputi temperatur, konduktivitas, salinitas, *potential of hydrogen* (pH), *Total Dissolved Solids* (TDS), *Dissolved Oxygen* (DO), *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) dan *Chemical Oxygen Demand* (COD).

Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis dengan uji Kruskal-Wallis untuk mengetahui perbedaan kadar logam Cu, dan Zn pada air, sedimen dan cacing *D. clapedii* antar lokasi pengamatan. Uji korelasi Spearman dilakukan untuk mengetahui korelasi antara konsentrasi logam berat pada air, sedimen, dan *D. clapedii*. Kemampuan akumulasi logam



Gambar 1. Peta pengambilan sampel (Sumber : Google Earth 2020)

dianalisis menggunakan *Bioconcentration Factor* (disingkat BCF dan diterjemahkan sebagai ‘Faktor Biokonsentrasi’) yaitu kemampuan organisme dalam mengakumulasi bahan kimia (polutan) dalam tubuhnya yang didefinisikan sebagai perbandingan antara konsentrasi polutan pada lapisan tubuh organisme (C_o) dan konsentrasi bahan kimia pada air (C_w) atau sedimen (C_s) tempat tereksposnya organisme tersebut (Arnot *et al.*, 2006). Faktor konsentrasi dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$BCF = \frac{C_o}{C_w}$$

Menurut Baker (1981) nilai Faktor Biokonsentrasi (BCF) ada tiga kategori, yaitu:

1. $BCF < 1$ dikategorikan dalam kelompok ekskluder
2. $BCF = 1$ dikategorikan dalam kelompok indikator
3. $BCF > 1$ dikategorikan dalam kelompok akumulator

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Filogenetik *Coffea canephora*

Hasil penelitian menunjukkan konsentrasi Cu, Cr dan Zn dalam air, sedimen, tubuh cacing *D. clapedii* di Perairan Donan bervariasi di empat stasiun pengambilan sampel. Berdasarkan Tabel 1. konsentrasi logam berat pada cacing, sedimen, dan air di empat stasiun pengamatan terlihat adanya perbedaan nyata yang berkaitan erat dengan karakteristik masing-masing lokasi. Stasiun 1 berada di kawasan hutan mangrove; Stasiun 2 di sekitar industri semen; Stasiun 3 di kawasan industri minyak; dan Stasiun 4 di area Dermaga Sleko yang padat aktivitas pelayaran.

Konsentrasi logam berat di Stasiun 1 menunjukkan konsentrasi relatif lebih rendah dibandingkan stasiun lain, baik pada media cacing, sedimen, maupun air (Tabel 1). Kondisi tersebut mencerminkan peran ekosistem mangrove sebagai penyangga alami (natural buffer) terhadap pencemaran logam berat. Mangrove diketahui mampu mengikat logam berat melalui akar, sedimen berlumpur, serta bahan organik yang tinggi, sehingga mengurangi mobilitas logam ke kolom air (Heriyanto dan Subiandono, 2011; Alongi, 2014).

Peningkatan konsentrasi logam berat terlihat pada Stasiun 2, terutama Zn, baik di sedimen maupun pada cacing (Tabel 1.). Industri semen diketahui berpotensi melepaskan logam berat melalui debu kiln, limbah cair proses, serta limpasan bahan baku seperti batu kapur dan tanah liat yang secara alami mengandung Zn (Alloway, 2013). Penemuan tersebut konsisten dengan penelitian Li *et al.*, (2018) yang menuliskan peningkatan Cr dan Zn dalam sedimen perairan di sekitar industri semen di wilayah pesisir China. Konsentrasi logam berat yang lebih tinggi pada cacing menunjukkan adanya bioakumulasi, mengingat organisme benthik bersifat menetap dan berinteraksi langsung dengan sedimen yang terkontaminasi (Luoma dan Rainbow, 2008).

Konsentrasi logam berat tertinggi di Stasiun 3 terjadi di sebagian besar parameter, khususnya Cu dan Zn pada sedimen dan cacing, serta nilai COD yang relatif tinggi (Tabel 1.). Aktivitas industri minyak berpotensi menjadi sumber logam berat melalui air yang diproduksi (produced water), tumpahan minyak, korosi pipa, serta penggunaan katalis yang mengandung logam (Neff *et al.*, 2011). Penelitian tersebut sesuai dengan penelitian Kumar *et al.*, (2018) dan Mohamed *et al.*, (2020) yang melaporkan lingkungan industri minyak cenderung memiliki konsentrasi Cu dan Zn yang tinggi akibat proses korosi logam dan keausan mekanis.

Tabel 1. Parameter lingkungan di setiap lokasi pengambilan sampel

Parameter	Stasiun				PP
	1	2	3	4	
logam berat					
Cu di cacing (mg/kg)	1,17±0,02	1,95±0,03	1,96±0,09	2,15±0,25	-
di sedimen (mg/kg)	8,01±0,01	12,15±0,08	15,05±0,04	15,54±11,04	-
di air (mg/L)	0,88±0,01	0,99±0,01	1,02±0,00	0,91±0,01	0,05
Zn di di cacing (mg/kg)	13,70±0,24	18,43±0,31	25,56±0,20	20,29±0,05	-
di sedimen (mg/kg)	9,78±0,07	12,80±0,16	20,87±0,02	14,76±0,30	-
di air (mg/L)	0,35±0,02	1,92±0,01	2,52±0,04	1,82±0,01	0,095
parameter pendukung					
Temperatur (°C)	31,93±1,65	32,26±0,80	32,13±2,44	31,4±1,02	28-32
Konduktivitas (uS/cm)	44,33±7,23	43,73±11,81	45,83±7,48	42,8±10,18	-
Salinitas (ppt)	8,07±9,29	7,43±8,02	8,62±10,11	1,87±1,47	s/d 34
pH	7,45±0,06	7,95±0,41	7,73±0,032	7,72±0,06	7-8,5
TDS (mg/L)	22,03±3,84	22,03±3,84	24,83±1,44	21,16±5,48	-
DO (mg/L)	5,31±0,19	6,44±1,13	5,94±1,63	5,64±0,2	>5
BOD (mg/L)	33,5±21,92	49,5±47,37	45±24,04	25,5±16,26	20
COD (mg/L)	354,5±43,13	322,5±12,02	562±205,06	434,5±212,83	-

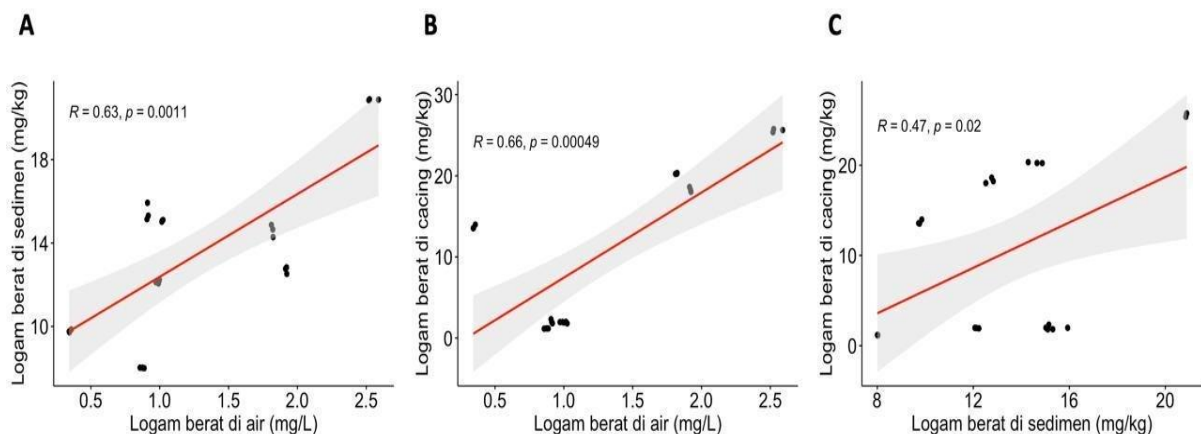
Data rata-rata ± standar deviasi, dengan nilai yang dicetak tebal menunjukkan konsentrasi yang melebihi ambang batas yang ditetapkan oleh Peraturan Pemerintah (PP) Indonesia N0.22 Tahun 2021, Lampiran VIII

Konsentrasi logam berat di Stasiun 4 yang berada di kawasan dermaga dan aktivitas pelayaran menunjukkan konsentrasi logam berat yang fluktuatif namun relatif tinggi, terutama Cu dan Zn (Tabel 1). Sumber utama logam berat di area dermaga umumnya bersumber dari kegiatan kapal, seperti pelapukan cat anti-fouling, tumpahan bahan bakar, serta buangan domestik kapal (Bryan dan Langston, 1992). Penelitian di berbagai pelabuhan di Indonesia dan Asia Tenggara menunjukkan bahwa logam berat Cu dan Zn sering menjadi logam dominan di sedimen pelabuhan akibat penggunaan cat anti-fouling berbasis tembaga (Harino *et al.*, 2006; Birch, 2018). Akumulasi logam berat pada cacing di stasiun ini mengindikasikan tekanan pencemaran kronis yang berpotensi memengaruhi struktur komunitas bentik.

Hasil penelitian dari Tabel 1, jumlah Cu dan Zn dalam tubuh *D. claparedii* berkisar antara $1,17 \pm 0,02$ mg/kg sampai $2,15 \pm 0,25$ mg/kg; dan $13,70 \pm 0,024$ mg/kg sampai $25,56 \pm 0,20$ mg/kg. Hasil tersebut menunjukkan bahwa cacing tersebut resisten terhadap kedua logam dan memiliki kemampuan untuk menyerap unsur logam yang serupa dengan spesies Eropa *D. neapolitana* (Freitas *et al.*, 2012; Arias *et al.*, 2023). Konsentrasi logam yang terakumulasi dalam tubuh *D. claparedii* ditemukan jauh lebih tinggi daripada konsentrasi logam pada kelompok hewan akuatik lain yang menghuni Perairan Donan seperti bivalvia, krustasea, dan ikan (Lestari *et al.*, 2025). Ikan belanak (*Chelon subviridis*) mampu mengakumulasi Cu dan Cd sebesar 0,5009-2,6021 dan 0,0165-0,2307 mg/kg (Prastyo *et al.*, 2017). Hal tersebut menunjukkan bahwa spesies ini memiliki kemampuan tinggi untuk menyerap kontaminasi logam dari lingkungan sekitarnya.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi logam berat dalam tubuh *D. claparedii* memiliki korelasi positif yang kuat dengan konsentrasi logam berat di sedimen Perairan Donan

($R = 0,47$; $p = 0,02$ Gambar 2C), dan korelasi positif yang kuat juga dengan konsentrasi logam berat di air ($p < 0,05$; Gambar 2B), serta korelasi positif yang kuat antara logam berat dalam tubuh *D. claparedii* dan logam berat di sedimen dapat dikaitkan dengan kehidupan dan kebiasaan makan hewan akuatik (Arifin *et al.*, 2012). *D. claparedii* dewasa merupakan organisme infauna bentik yang hidup di sedimen Perairan Donan sepanjang hidupnya (Pamungkas *et al.*, 2025). Cacing tersebut terus-menerus terpapar kontaminan logam berat yang mengendap di sedimen (jumlah logam di media air berkorelasi positif ($R = 0,63$; $p = 0,0011$; Gambar 2A) dengan yang ada di sedimen), sehingga mengakibatkan akumulasi logam di jaringan tubuh cacing. Logam-logam tersebut juga masuk ke tubuh cacing melalui penyerapan makanan cacing. Sementara cacing *D. claparedii* diketahui omnivora yang memakan organisme akuatik yang hidup di tutup tabung, di tutup tabung tetangga, dan di dalam sedimen di dekatnya (Berke, 2022), beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa sejumlah hewan akuatik di Perairan Donan dilaporkan terkontaminasi dengan logam berat (Annisa, 2023). Beberapa spesies polychaeta telah mengembangkan mekanisme detoksifikasi. Cacing dapat menghasilkan protein pengikat logam seperti metallothionein (MT) atau protein mirip metallothionein (MTLP), yang mengkelat dan menetralkan logam beracun di dalam jaringan cacing (Zhao *et al.*, 2020). Cacing juga dapat mengatur konsentrasi logam internal dengan menghambat penyerapan logam atau meningkatkan ekskresinya (Sun dan Zhou, 2007). Meskipun demikian, kelainan morfologi pada *D. claparedii* yang berada di Perairan Donan kemungkinan terkait dengan paparan logam berat telah didokumentasikan oleh Pamungkas *et al.* (2025), yang menunjukkan bahwa efek merugikan dari logam tersebut mungkin tidak sepenuhnya dapat dihindari.



Gambar 2. Analisis korelasi Spearman. R adalah koefisien korelasi Spearman. Hasil dianggap signifikan jika $p < 0,05$. Garis linier merah solid menunjukkan korelasi positif. Arsiran abu-abu mewakili kesalahan standar

Tabel 2. Faktor biokonsentrasi di setiap stasiun penelitian

Stasiun	BCF (c-s)	BCF (c-a)	CF (s-a)
Stasiun 1			
-Cu	0,146	1,330	20,460
-Zn	1,400	39,143	11,113
Stasiun 2			
-Cu	0,160	1,970	12,272
-Zn	0,878	9,599	12,929
Stasiun 3			
-Cu	0,878	1,922	14,754
-Zn	1,224	10,143	20,460
Stasiun 4			
-Cu	0,138	2,363	17,076
-Zn	1,374	11,148	16,219

Keterangan: BCF=Faktor Biokonsentrasi; CF= Faktor Konsentrasi; c= cacing; s= sedimen; a= air

Nilai BCF (c-s) untuk logam berat Cu di seluruh stasiun lebih kecil dari 1, yaitu berkisar antara 0,130 sampai 1,439 (Tabel 2). Nilai mengindikasikan bahwa *D. Clapedii* bersifat ekskluder terhadap Cu dalam sedimen, artinya cenderung membatasi penyerapan tembaga dari sedimen ke dalam jaringan tubuhnya. Kondisi ini diduga berkaitan dengan mekanisme homeostasis internal yang mampu mengatur keseimbangan Cu, mengingat Cu merupakan unsur esensial yang dibutuhkan dalam jumlah kecil, namun bersifat toksik apabila terakumulasi secara berlebihan. Temuan ini sejalan dengan penelitian Rainbow (2002) dan Luoma dan Rainbow (2008) yang menyatakan bahwa banyak organisme benthik memiliki kemampuan regulasi terhadap logam esensial seperti Cu sehingga akumulasinya relatif rendah pada kondisi lingkungan tertentu.

Logam Zn menunjukkan pola yang berbeda. Nilai BCF (c-s) untuk logam berat Zn pada seluruh stasiun berada di atas 1, yaitu antara 1,224–1,439 (Tabel 2). Hal tersebut menunjukkan bahwa *D. clapedii* bersifat akumulator terhadap Zn yang ada di sedimen. Seng merupakan logam esensial yang berperan dalam aktivitas enzimatis dan metabolisme sel, sehingga organisme cenderung menyerapnya secara aktif. Namun, tingginya nilai BCF juga mengindikasikan bahwa konsentrasi Zn di sedimen telah cukup tinggi sehingga mendorong terjadinya bioakumulasi. Hasil tersebut sesuai penelitian Hidayati *et al.* (2013) yang melaporkan bahwa organisme benthik di perairan Segara Anakan dan sekitarnya menunjukkan akumulasi Zn yang relatif tinggi akibat pengaruh aktivitas industri dan sedimentasi.

Nilai BCF (c-a) menunjukkan sifat akumulatif *D. clapedii* yang lebih jelas. Untuk logam berat Cu, nilai BCF (c-a) berada pada kisaran 1,330–2,363 di seluruh stasiun, yang menunjukkan bahwa *D. clapedii* berperan sebagai bioakumulator Cu dari kolom air. Hal (Tabel 2) mengindikasikan bahwa meskipun Cu relatif terkontrol dalam sedimen,

namun ketersediaannya dalam fase terlarut cukup tinggi sehingga mudah diserap melalui permukaan tubuh atau sistem respirasi. Kondisi ini sejalan dengan penelitian Luoma *et al.* (2010) yang menyebutkan bahwa paparan logam terlarut seringkali lebih berpengaruh terhadap bioakumulasi pada invertebrata akuatik dibandingkan paparan dari sedimen.

Nilai BCF (c-a) untuk logam berat Zn juga menunjukkan nilai lebih besar dari 1 pada seluruh stasiun, yaitu berkisar antara 9,599–39,143. Hal tersebut menunjukkan bahwa *D. clapedii* bersifat akumulator terhadap logam berat Zn yang ada di air. Nilai tertinggi ditemukan pada Stasiun 1 dan 2 yang menunjukkan bahwa meskipun lokasi tersebut relatif jauh dari industri, proses sedimentasi, aktivitas domestik, serta aliran sungai tetap berkontribusi terhadap peningkatan konsentrasi logam berat Zn yang terlarut di air. Hasil ini konsisten dengan penelitian Mohamed *et al.* (2020) dan Kumar *et al.* (2018) yang melaporkan tingginya bioakumulasi Zn pada organisme benthik di wilayah pesisir yang terpapar aktivitas antropogenik.

Penelitian juga menunjukkan bahwa kadar kedua logam berat dalam media air Perairan Donan di semua lokasi pengambilan sampel, yaitu berkisar antara $0,35 \pm 0,02$ mg/L dan $2,52 \pm 0,04$ mg/L, telah melampaui ambang batas yang ditetapkan oleh Pemerintah Indonesia (Tabel 1). Hasil tersebut sesuai penelitian Piranti *et al.* (2020) bahwa sebagian besar parameter lingkungan lainnya seperti temperatur, konduktivitas, salinitas, pH, TDS dan DO masih memenuhi baku mutu air nasional. Tingginya kadar BOD (yaitu dari $25,5 \pm 16,26$ mg/L menjadi $49,5 \pm 47,37$ mg/L) dan COD (yaitu dari $322,5 \pm 12,02$ mg/L menjadi $562 \pm 205,06$ mg/L) menunjukkan tingginya pencemaran organik yang terjadi di Perairan Donan, kemungkinan besar akibat aktivitas antropogenik di darat. Hasil ini sejalan dengan penelitian Dsikowitzky *et al.* (2011) yang menyatakan bahwa Perairan Donan sebagian besar telah terkontaminasi oleh PAHs.

SIMPULAN

D. clapedii mampu mengakumulasi Cu dan Zn dari lingkungan, dengan konsentrasi logam dalam tubuhnya berkorelasi positif dengan konsentrasi logam pada sedimen dan air. Pola bioakumulasi menunjukkan bahwa *D. clapedii* berperan sebagai ekskluder Cu dari sedimen, tetapi sebagai akumulator Zn dari sedimen, serta sebagai akumulator kuat terhadap Cu dan terutama Zn dari kolom air. Kemampuan akumulasi tersebut, ditambah dengan sifatnya sebagai organisme benthik yang hidup dan mencari makan pada sedimen, menunjukkan bahwa *D. clapedii* berpotensi digunakan sebagai bioindikator biologis untuk memantau pencemaran logam berat di Perairan Donan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Jenderal Soedirman atas dana hibah penelitian yang diberikan melalui skema pendanaan Penelitian Dasar (MoU No. 27.255/UN23.37/PT.01.03/II/2023). Proyek penelitian ini dilaksanakan melalui kerja sama dengan Pusat Riset Biosistemika dan Evolusi, Badan Riset dan Inovasi Nasional (MoU No. 92/V/KS/08/2022 dan T/502/UN23.6/HK.06.00/2022).

DAFTAR REFERENSI

- Alloway, B. J. (2013). *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*. Springer
- Annisa, A.C.N. (2023). Analisis kandungan logam berat kadmium (Cd) dan kromium (Cr) pada kerang totok (*Polymesoda erosa*) di perairan Segara Anakan, Cilacap. *Thesis*, Jenderal Soedirman University
- Arias A, Woodin, S.A, & Paxton, H. 2024. An introduction to *Diopatra*, the amazing ecosystem engineering polychaete. *Biol* 12, 1027: 1-19
<https://doi.org/10.3390/biology12071027>
- Arifin Z, Puspitasari R, & Miyazaki, N. (2012). Heavy metal contamination in Indonesian coastal marine ecosystems: A historical perspective. *Coast Mar Sci* 35(1): 227–233.
<https://doi.org/10.15083/00040657>
- Badan Standarisasi Nasional. 2021. Cara uji kadar logam dalam contoh uji limbah padat, sedimen dan tanah dengan metode destruksi asam menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA) – nyala / Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometric (ICP-OES) (SNI 8910:2021.), Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2019. Cara uji kadar logam terlarut dan logam total secara Spektrofotometer Serapan Atom (SSA) (SNI 6989-84:2019), Jakarta.
- Berke, S.K. 2022. A review of *Diopatra* ecology: current knowledge, open questions, and future threats for an ecosystem engineering polychaete. *Biol* 11, 1485: 1–14.
<https://doi.org/10.3390/biology11101485>
- Birch, G. F. (2018). A review of chemical contamination in ports and harbours. *Marine Pollution Bulletin*, 128, 214–231.
- Bryan, G. W., & Langston, W. J. (1992). "Bioavailability, Accumulation and Effects of Heavy Metals in Sediments with Special Reference to United Kingdom Estuaries: A Review." *Environmental Pollution*, 76(2), 89–131
- Bryan, G. W., & Gibbs, P. E. (1983). Heavy metals in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 14, 408–413.
- Darmono, B. (2001). *Lingkungan Hidup dan Pencemaran: Hubungannya dengan Toksikologi Senyawa Logam*. Jakarta: UI Press.
- Dsikowitzky, L., Nordhaus, I., Jennerjahn, T.C., Khrycheva, P., Sivatharshan, Y., Yuwono, E., & Schwarzbauer, J. (2011). Anthropogenic organic contaminants in water, sediments and benthic organisms of the mangrove-fringed Segara Anakan Lagoon, Java, Indonesia. *Mar Pollut Bull* 62(4): 851–862
- Eshmat, N., et al. (2014). The Role of pH and Salinity in Heavy Metal Bioavailability in Estuarine Environments. *Journal of Environmental Protection*, 5(12): 1109-1118.
- Freitas, R., Pires, A., Quintino, V., Rodrigues, A.M., & Figueira, E. 2012. Subcellular partitioning of elements and availability for trophic transfer: Comparison between the bivalve *Cerastoderma edula* and the polychaete *Diopatra neapolitana*. *Estuar Coast Shelf Sci* 99: 21–30.
- Harino, H., M. Yamamoto, Q. W. Kawai, T. Kakutani, K. Kurokawa, A. Arai, M. Ohji, M. Miyazaki, and N. Baba (2006). Distribution of antifouling biocides in port sediments. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 50, 179–186.
- Hawkes, H.A. (1979). Invertebrates as Indicators of River Water Quality. Dalam: *Biological Indicator of Water Quality*. James, A. & Evison, L. (Eds.). New York: John Wiley and Sons.
- Hidayati, N. V., Siregar, A. S., Sari, L. K., & Putra, G. L. (2013). *Pendugaan tingkat kontaminasi logam berat Pb, Cd dan Cr pada air dan sedimen di perairan Segara Anakan, Cilacap*. *Omni-Akuatika*, 10(1), 30–39. <http://dx.doi.org/10.20884/1.oa.2014.10.1.14>
- Jin, T., et al. (2019). Surface characterization and corrosion behavior of 90/10 copper–nickel alloy in marine environment. *Materials*, 12(11), 1869. <https://doi.org/10.3390/ma12111869>
- Kumar, V., et al. (2018). Heavy metal contamination in oil industry environments. *Marine Pollution Bulletin*, 127, 456–465.

- Lestari, S., W. Lestari, E. S. Wibowo, P. Sucharitakul, J. Pamungkas (2025). The Use of *Diopatra clapedii* Grube, 1878 (Onuphidae, Polychaeta) as a Bioindicator of Heavy Metal Contaminations in the Donan Creek, Cilacap, Central Java, Indonesia. *Indonesian Journal of Marine Sciences*. Vol 30 (4), pp. 586 – 592
- Lestari, S. dan T. A. Rohmannto. 2020. Macrozoobenthos diversity as a bioindicator of heavy metal pollution in Segara Anakan lagoon, cilacap district, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 550- 012015
- Li, X. 2018. Heavy metal pollution around cement industries. *Environmental Earth Sciences*, 77, 1–13
- Lubis, R. T., & Pramesthy, T. D. (2019). Bioakumulasi Cu dan Zn pada polychaeta di wilayah pesisir yang terkontaminasi aktivitas industri. *Jurnal Kelautan Tropis*, 22(3), 201–210.
- Luoma, S. N., et al. (2010). Bioavailability of dissolved metals in aquatic systems. *Environmental Science & Technology*, 44(15), 5885–5891.
- Luoma, S. N., & Rainbow, P. S. (2008). *Metal Contamination in Aquatic Environments*. Cambridge University Press.
- Mohamed, R. M. S. R., et al. (2020). Corrosion-derived metals in oil industry effluents. *Journal of Environmental Management*, 260, 110–118.
- Mukti, G.T., Prayogo, T.B., & Haribowo, R. (2021). Studi Penentuan Status Mutu Air dengan Menggunakan Metode Indeks Pencemaran dan Metode Water Quality Index (WQI) Di Sungai Donan Cilacap, Jawa Tengah. *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Sumber Daya Air*, 1(1): 238–251.
- Neff, J. M., et al. (2011). *Produced Water: Environmental Risks and Advances in Mitigation*. Springer.
- Pamungkas, J., Wibowo, E.S., Alam, M. and Lestari, S., 2025. Pollutants May Have Caused Morphological Abnormalities in Some Polychaete Species (Annelida) Collected from Cilacap, Central Java, Indonesia. *Tropical Life Sciences Research*, 36(1), p.297.
- Piranti, A.S., Rahayu, D.R.U.S., Ardli, E.R., Setyaningrum, N., Widyartini, D.S., & Insan, I. 2020. Water quality status of Segara Anakan, Cilacap, Indonesia, for biota life. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 593(1): 012038.
- Prastyo, Y., Batu, D.T.F.L dan Sulistiono. 2017. Kandungan Logam Berat Cu dan Cd pada Ikan Belanak di Estuari Sungai Donan, Cilacap, Jawa Tengah. *JPHPI*, Vol 20 (1), pp. 18-28
- Rahmawati, S., Fadhlina, N., & Arifin, Z. (2020). Distribusi logam berat di sedimen dan air estuari dan hubungannya dengan fraksi sedimen. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(1), 45–56.
- Rainbow, P. S. (2002). Trace metal concentrations in aquatic invertebrates. *Environmental Pollution*, 120, 497–507.
- Rudiyanti, A. S., B. Yulianto, A. Santoso. (2021). Kandungan Logam Berat Timbal (Pb) pada Air, Sedimen dan Kerang Hijau (*Perna viridis*) di Pantai Mekar, Bekasi. *Journal of Marine Research*, 10(3): 428-436.
- Sun, F.H. and Zhou, Q.X., 2007. Metal accumulation in the polychaete *Hediste japonica* with emphasis on interaction between heavy metals and petroleum hydrocarbons. *Environmental Pollution*, 149(1), pp.92–98.
- Zhao, H., Wang, M., Pang, M., Sun, J., Huang, Y., Gao, F., Yang, D., Zhou, Y. and Wang, B., 2020. Quantitative immunodetection of metalloprotein II in *Perinereis aibuhitensis* after heavy metal exposure. *Marine Pollution Bulletin*, 160, p.111550.