

Konsentrasi dan Risiko Logam Berat pada Ikan Kembung (*Rastrelliger kanagurta*) dari Perairan Balikpapan

Irwan Ramadhan Ritonga^{1,2*}, Marsanda Marsanda¹, Muhammad Ikhsan Saputra¹,
Irma Suryana¹, Mohammad Sumiran Paputungan¹

¹Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Mulawarman
Jl. Gunung Tabur No 1, Kampus Gunung Kelua, Kota Samarinda, 75243

²Laboratorium Oseanografi, Laboratorium Terpadu, Universitas Mulawarman
Jl. Long Apari No 1, Kampus Gunung Kelua, Kota Samarinda, 75243
Email: ritonga_irwan@fpik.unmul.ac.id

Abstract

Heavy Metal Concentration and Risk in Indian Mackerel (*Rastrelliger kanagurta*) from Balikpapan Waters

Indian mackerel (*Rastrelliger kanagurta*) from the waters of Balikpapan is a significant nutrient source for the community of East Kalimantan. However, anthropogenic activities around the Balikpapan Bay have the potential to contaminate the fish with heavy metals, posing a health risk to consumers across different age groups: children (≤ 10 years), adolescents (11-17 years), and adults (≥ 18 years). This study aimed to determine the concentrations of As, Cu, Fe, Mn, and Zn in the muscle tissue of *R. kanagurta* and to analyze the associated health risks from its consumption. A total of nine *R. kanagurta* samples were captured and collected from Balikpapan waters by local fishermen. The fish samples were digested using the acid digestion method and analyzed using an Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS). The results showed that the mean concentrations of each metal As (0.29), Cu (0.08), Fe (0.51), Mn (0.02), and Zn (0.34) mg/kg dry weight were below the established safety standards for human consumption. The order of metal concentrations in *R. kanagurta*, from highest to lowest, was $Fe > Zn > As > Cu > Mn$. Risk analysis revealed that the Estimated Daily Intake (EDI) values were lower than the Provisional Tolerable Daily Intake (PTDI) for each respective metal. All Target Hazard Quotient (THQ) and Total Target Hazard Quotient (TTHQ) values for all age groups (adults, adolescents, children) were less than one. Therefore, it could be concluded that the consumption of *R. kanagurta* is safe and does not pose a non-carcinogenic health risk to consumers across all studied age groups.

Keywords: Fish; Balikpapan; Consumption; Metal; Human Body

Abstrak

Ikan kembung (*Rastrelliger kanagurta*) dari perairan Balikpapan merupakan salah satu sumber nutrisi bagi masyarakat Kalimantan Timur. Namun, aktivitas antropogenik di sekitar Teluk Balikpapan berpotensi mencemari ikan dengan logam berat, sehingga berisiko bagi kesehatan konsumen dari berbagai kelompok usia yang berbeda, yakni anak-anak (≤ 10 tahun), remaja (11 - 17 tahun) hingga dewasa (≥ 18 tahun). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan konsentrasi As, Cu, Fe, Mn dan Zn dalam daging *R. kanagurta* dan mengevaluasi risiko kesehatan konsumen akibat mengkonsumsinya. Total 9 sampel *R. kanagurta* ditangkap dan dikumpulkan dari perairan Balikpapan oleh nelayan lokal. Sampel ikan dididestruksi menggunakan metode asam dan dianalisis menggunakan Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS). Hasil menunjukkan bahwa rerata konsentrasi dari masing – masing logam seperti As adalah 0,29, Cu (0,08), Fe (0,51), Mn (0,02) dan Zn (0,34) mg/kg berat kering berada di bawah baku mutu yang ditetapkan untuk konsumsi manusia. Urutan konsentrasi logam tertinggi sampai terendah pada *R. kanagurta* adalah $Fe > Zn > As > Cu > Mn$. Analisis risiko menemukan bahwa Nilai Asupan Harian (PAH) lebih rendah dibanding nilai Provisional Tolerable Daily Intake (PTDI) dari masing masing logam. Semua nilai target bahaya (TB) dan total target bahaya (TTHB) untuk semua kelompok usia (dewasa, remaja, anak – anak) kurang dari satu. Karenanya, dapat disimpulkan bahwa konsumsi *R. kanagurta* masih aman dan tidak menimbulkan risiko kesehatan terhadap tubuh konsumen dari semua kelompok usia yang diteliti.

Kata kunci : Ikan; Balikpapan; Konsumsi; Logam; Tubuh Manusia

PENDAHULUAN

Kontaminasi logam berat di wilayah pesisir merupakan salah satu dampak lingkungan yang erat kaitannya dengan masukan aktivitas manusia (antropogenik) dari sektor industri, pelabuhan, dan pemukiman perkotaan. Kota Balikpapan sebagai kota industri dan gerbang transportasi di Kalimantan Timur, berisiko mengalami akumulasi logam berat seperti arsen (As), tembaga (Cu),

besi (Fe), mangan (Mn), zinc (Zn) baik perairan, sedimen dan organisme perairannya. Logam berat tersebut dapat berasal dari proses alami dan juga berasal dari beberapa aktifitas manusia di sekitar perairan Balikpapan seperti pertanian, perikanan, alih fungsi lahan, pembuangan sampah kota dan limbah industri tanpa pengolahan, transportasi, pelayaran, pembakaran bahan bakar, serta penyulingan minyak dan gas (Ashar *et al.*, 2025; Sahri *et al.*, 2021; Suyatna *et al.*, 2019; Syafira *et al.*, 2023; Tarigan *et al.*, 2017). Dikarenakan sifatnya persisten, bioakumulatif, dan toksik, logam berat berpotensi terakumulasi dalam organisme laut khususnya, pada ikan konsumsi seperti ikan kembung (*Rastrelliger kanagurta*) yang banyak ditangkap di perairan Balikpapan.

Ikan kembung merupakan salah satu komoditas perikanan yang banyak dikonsumsi oleh masyarakat di wilayah Kalimantan Timur, khususnya di kota Balikpapan (Alfian *et al.*, 2020). Ikan ini merupakan salah satu sumber protein yang berguna bagi tubuh manusia baik pada usia anak-anak, remaja maupun dewasa. Kandungan gizi pada ikan ini meliputi kadar air (75,0%), protein (21,6 %), lipid (1,70 %) dan abu (1,40 %) (Bahurmiz *et al.*, 2017). Oleh karena statusnya merupakan salah satu sumber nutrisi masyarakat pesisir, keamanan konsumsi ikan kembung memiliki implikasi kesehatan masyarakat. Disisi lain, *R. kanagurta* juga berisiko menjadi pembawa logam berat ke dalam tubuh manusia baik pada usia anak – anak, remaja dan dewasa. Jika ikan ini terpapar logam yang tinggi dan dikonsumsi oleh manusia secara terus menerus, mungkin dapat menimbulkan efek kesehatan kronis seperti gangguan saraf, kerusakan ginjal, hingga kanker (Ray & Vashishth, 2024). Kondisi ini mengancam ketahanan pangan dan kualitas hidup masyarakat, yang mana sumber nutrisi tersebut berpotensi menjadi vektor penyakit kronis terhadap tubuh manusia. Oleh karena itu, diperlukan investigasi untuk menentukan kandungan logam berat pada *R. kanagurta* di perairan Balikpapan. Selain itu, potensi risiko kesehatan akibat paparan logam berat melalui konsumsi ikan kembung ini harus dievaluasi secara komprehensif.

Penelitian terdahulu tentang logam berat di perairan Balikpapan telah dilakukan, salah satunya adalah analisis kandungan Cd dan Pb pada ikan Kembung (*Rastrelliger kanagurta*) yang menunjukkan bahwa konsentrasi logam pada beberapa organ masih dibawah ambang batas (Marsanda *et al.*, 2026). Selain itu, investigasi lain juga telah mengukur logam seperti As, Cu, Fe, Mn dan Zn pada kerang (Satriawan *et al.*, 2026), serta Pb, Cd, Cu, As pada biota perairan lainnya (Sitorus *et al.*, 2020). Walaupun hasil penelitian menunjukkan konsentrasi beberapa logam pada biota perairan belum melampaui baku mutu untuk keamanan pangan, temuan ini mengindikasikan bahwa kontaminasi logam berat di perairan Balikpapan cukup mengkhawatirkan bagi kesehatan manusia jika dikonsumsi dalam jangka panjang. Oleh karena itu, penelitian lanjutan sangat diperlukan untuk mengukur keberadaan logam lain seperti As, Cu, Fe, Mn dan Zn pada ikan Kembung. Kelima logam ini dipilih karena memiliki karakteristik dan risiko kesehatan yang spesifik.

Pada dasarnya, Arsenik (As) merupakan logam non-esensial yang bersifat toksik dan karsinogenik bagi tubuh manusia. Sebaliknya, Tembaga (Cu), Besi (Fe), Mangan (Mn), dan Seng (Zn) merupakan logam esensial yang dibutuhkan tubuh dalam jumlah kecil, tetapi berpotensi menimbulkan efek toksik jika terakumulasi secara berlebihan di dalam jaringan tubuh, seperti otot ikan yang dikonsumsi (Jaishankar *et al.*, 2014). Kombinasi logam esensial dan non-esensial ini memberikan gambaran risiko yang lebih komprehensif dibandingkan hanya meneliti logam toksik saja. Lebih lanjut, kajian risiko kesehatan berdasarkan kelompok usia konsumen seperti anak-anak, remaja, dan dewasa di wilayah Balikpapan masih sangat minim. Keterbatasan data tersebut, ditambah dengan belum adanya penilaian risiko yang terstratifikasi menurut usia, menghambat upaya protektif kesehatan masyarakat yang tepat sasaran dan perumusan kebijakan keamanan pangan yang berbasis bukti lokal. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menentukan konsentrasi As, Cu, Fe, Mn dan Zn pada otot *R. kanagurta* yang dikumpulkan dari perairan Balikpapan, serta mengevaluasi risiko kesehatan potensial akibat konsumsinya secara terpisah berdasarkan kelompok usia konsumen.

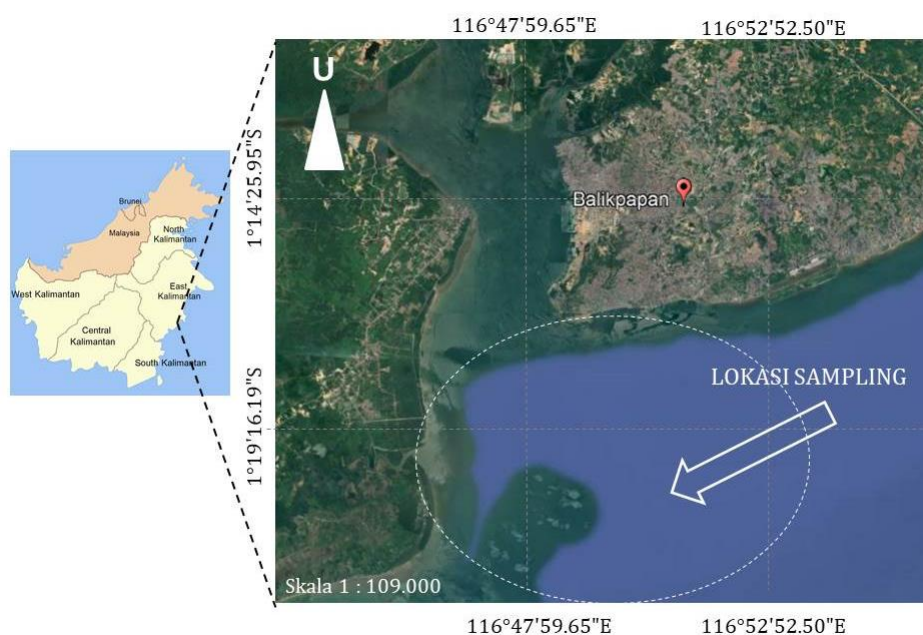
MATERI DAN METODE

Total sembilan ekor sampel *R. kanagurta* ditangkap pada bulan Desember 2024 menggunakan pukat cincin (*Purse seine*) oleh nekayan lokal di perairan Balikpapan, propinsi Kalimantan Timur (Gambar 1). Setelah ikan dibeli dan dikumpulkan, masing - masing ikan dimasukkan ke dalam *cool box* yang telah diberi es, dan segera dibawa ke laboratorium untuk menghindari proses kontaminasi.

Metode penelitian yang dilakukan di penelitian ini adalah metode survei, sedangkan teknik sampling yang digunakan adalah *purposive sampling* di sekitar Teluk Balikpapan. Jenis penelitian yang digunakan di penelitian ini adalah kuantitatif yang bertujuan menentukan konsentrasi As, Cu, Fe, Mn, dan Zn pada *R. kanagurta* dari perairan Balikpapan. Selain itu, evaluasi risiko kesehatan akibat paparan logam As, Cu, Fe, Mn dan Zn juga dilakukan terhadap konsumen dengan usia yang berbeda yakni dewasa, remaja dan anak - anak.

Proses identifikasi jenis *R. kanagurta* di penelitian ini dilakukan secara visual mengacu pada Ahmad *et al.*, (2018) berdasarkan ciri morfometrik, meliputi bentuk tubuh, sirip, dan pola garis gelap pada punggung. Masing - masing ikan dibelah menggunakan pisau *stainless* untuk diambil jaringan otot atau dagingnya. Kemudian, jaringan otot tersebut dimasukkan ke dalam wadah *aluminium foil* dan dimasukkan ke oven dengan suhu 60 °C selama $\pm$ 72 jam. Setelah sampel ikan kering, setiap sampel dihaluskan dan dihomogenkan menggunakan *mortar* dan *pestle*. Kemudian, masing - masing sampel dimasukkan ke dalam kantong plastik *zip-lock*, dan disimpan di dalam desikator untuk proses selanjutnya.

Beberapa bahan *reagent* yang digunakan di penelitian ini adalah asam nitrat (HNO_3 65 %, Merck), Asam klorida (HCl Merck) 6N, ammonium dihidrogen phosphate ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, Merck). Sebelum sampel dianalisis, dilakukan kalibrasi *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS) dengan larutan standar (0,1 - 2,0 mg/L) didapatkan dari proses pengenceran larutan induk (konsentrasi 1000 mg/L) dari beberapa logam As, Cu, Fe, Mn, dan Zn (*Sigma Aldrich, Germany*). Kemudian, beberapa instrumen yang digunakan adalah timbangan analitik (*Adventurer Analytical AX224*), oven (*Thermo Scientific*), *furnace* (Infitek), *hot plate*, *vortex mixer*, dan AAS type *iCE 3000* (*Thermo Scientific*).



Gambar 1. Lokasi Penangkapan ikan *R. kanagurta* di perairan Balikpapan

Proses destruksi sampel ikan mengikuti metode yang dilakukan oleh Satriawan *et al.*, (2026). Prosedur diawali dengan menimbang $\pm 0,5$ g sampel otot *R. kanagurta* (berat kering) menggunakan timbangan analitik (Adventurer Analytical AX224). Selanjutnya, sampel kosong (*blank*) dipindahkan ke dalam cawan porselen keramik dan dimasukkan ke dalam *furnace* (450 °C) selama ± 18 jam. Sampel dikeluarkan dari *furnace* dan dikeringkan dalam suhu ruang. Setelahnya, ditambahkan larutan HNO_3 65% (Merck) sebanyak 1 ml. Larutan sampel kembali dipanaskan di *hotplate* sampai kering. Dilanjutkan dengan memasukkan sampel kembali ke dalam *furnace* selama ± 5 jam (450 °C). Masing – masing sampel dikeluarkan dan ditambahkan larutan HCl 6N (Merck) sebanyak 5 ml dan dipanaskan sampai kering. Tahap selanjutnya, masing – masing sampel ditambahkan HNO_3 0,1 M sebanyak 10 ml, dan larutan $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ sebanyak 1 ml. Kemudian, sampel dipindahkan ke dalam labu ukur 50 ml, dan ditambahkan HNO_3 0,1 M sampai 50 ml. Akhirnya, masing – masing sampel disaring menggunakan kertas *Whatmann No.41* dan dipindahkan ke dalam wadah botol kaca gelap yang diberi kode. Kemudian, konsentrasi As, Cu, Fe, Mn dan Zn dianalisis menggunakan AAS type *iCE 3000*. Seluruh proses destruksi dan analisis sampel dilakukan di Laboratorium Kualitas Air, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Mulawarman. Semua konsentrasi As, Cu, Fe, Mn dan Zn di penelitian ini dinyatakan dengan mg/kg berat kering (*dry weight*).

Proses jaminan mutu dilakukan untuk memastikan keakuratan dan keandalan selama penelitian. Sebelum penelitian dilakukan, semua alat penelitian berupa cawan porselen keramik, botol dan pipet direndam dengan HNO_3 10% selama ± 24 jam, dan dibersihkan menggunakan akuades. Semua sampel ikan dan sampel *blank* didestruksi secara bersamaan di laboratorium yang bersih. Larutan standar ($n = 6$) dari masing – masing logam dengan nilai konsentrasi antara 0,1 hingga 2,50 mg/L dipersiapkan sebelum analisis sampel dilakukan. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai korelasi dari larutan standar di penelitian ini adalah 99%. Kemudian, batas deteksi (LOD) untuk setiap logam adalah sebagai berikut: As 0,076 mg/kg; Cu 0,0045 mg/kg; Fe 0,0043 mg/kg; Mn 0,0016 mg/kg; dan Zn 0,0033 mg/kg. Nilai persen pemulihan (% *recovery*) dari masing – masing logam di penelitian dilakukan dengan menggunakan metode *spike*. Hasil analisis menemukan bahwa nilai % *recovery* dari As 104 %; Cu 93,2 %; Fe 97,5 %; Mn 112 %; dan Zn 100%. Temuan ini menunjukkan bahwa prosedur destruksi dan analisis yang digunakan dalam penelitian ini memberikan akurasi yang memuaskan.

Adapun beberapa pendekatan yang dilakukan untuk mengkaji risiko kesehatan dari logam Cd pada tubuh manusia dengan berbagai cara seperti perkiraan asupan harian (PAH), target bahaya (TB) dan total target bahaya (TTB). Perkiraan asupan harian (PAH) masing – masing dari logam berat pada otot ikan dihitung dengan mengikuti persamaan Andini *et al.* (2024).

$$\text{PAH} = \frac{K \times \text{RKI}}{\text{BB}}$$

dimana PAH adalah perkiraan asupan harian ; K adalah konsentrasi logam (As, Cu, Fe, Mn, dan Zn) pada otot ikan (mg/kg); RKI adalah rerata konsumsi ikan di Kalimantan Timur yakni 0,13 kg/hari. BB adalah rerata berat badan konsumen anak – anak (10 tahun) 23,3 kg, remaja (17 tahun) 49 kg, dan dewasa (18 tahun keatas) 60 kg (Muljati *et al.*, 2016).

Target Bahaya (TB) digunakan untuk menentukan risiko kesehatan manusia (non-karsinogenik) terkait konsentrasi logam berat yang terkandung dalam otot ikan menggunakan persamaan yang digunakan oleh Andini *et al.* (2024) dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{TB} = \frac{\text{PF} \times \text{DP} \times \text{RKI} \times \text{K}}{\text{RfD} \times \text{BB} \times \text{WPn}} \times 10^{-3}$$

dimana TB adalah total target bahaya dari masing – masing logam. PF adalah paparan frekuensi logam berat (365 hari/tahun). DP adalah rerata durasi paparan logam (dewasa= 74,79 tahun; remaja = 17 tahun; anak – anak = 10 tahun) pada konsumen di Kaltim (BPS, 2023). RfD adalah

referensi dosis logam berat per individu ($As = 0,0003$; $Cu = 0,004$; $Fe = 0,7$; $Mn = 0,14$; $Zn = 0,3$ mg/kg/hari) berdasarkan tingkat skrining regional (Taylor *et al.*, 2023; USEPA, 2023). WPN : Rata-rata waktu paparan logam berat adalah nilai $PF \times DP$ (Dewasa = 27298,35 hari; remaja = 6205 hari; anak – anak = 100 hari).

Setelah mendapatkan nilai TB, nilai Total TB (TTB) ditentukan dari jumlah nilai TB dari masing-masing logam As, Cu, Fe, Mn, dan Zn. Adapun rumus yang dipakai untuk menentukan TTB adalah :

$$TTB = TB_{As} + TB_{Cu} + TB_{Fe} + TB_{Cu} + TB_{Mn}$$

Jika nilai TTB kurang dari satu ($TTB < 1$), dianggap tidak menimbulkan non-karsinogenik bagi tubuh manusia. Sebaliknya, jika nilai TB dan TTB lebih dari satu ($THQ/TTHQ > 1$), maka memungkinkan logam dapat menimbulkan risiko non-karsinogenik terhadap kesehatan manusia (Tanhan *et al.*, 2023).

Semua data hasil analisis di penelitian ini diolah secara statistik menggunakan *Microsoft Office Excel*. Nilai rerata $\pm$ standar deviasi dari konsentrasi logam dihitung dan dijelaskan secara deskriptif. Tingkat signifikan (p) yang dipakai di penelitian ini adalah $\alpha = 0,05$. Jika nilai $p < 0,05$, maka terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis statistik terhadap konsentrasi logam As, Cu, Fe, Mn dan Zn (mg/kg) dalam jaringan otot *R. kanagurta* dari perairan Balikpapan disajikan pada tabel 1. Ditemukan bahwa urutan konsentrasi logam dari tertinggi ke terendah adalah $Fe (0,51 \pm 0,12 \text{ mg/kg}) > Zn (0,34 \pm 0,03 \text{ mg/kg}) > As (0,29 \pm 0,25 \text{ mg/kg}) > Cu (0,08 \pm 0,03 \text{ mg/kg}) > Mn (0,02 \pm 0,01 \text{ mg/kg})$. Secara umum, seluruh konsentrasi logam yang terdeteksi pada otot ikan kembung dalam penelitian ini masih berada di bawah batas ambang yang ditetapkan oleh standar baku mutu MFR (1985), China (2001), dan BPOM (2009).

Berdasarkan lokasinya, sumber lokasi penangkapan ikan ini berada di sekitar Teluk Balikpapan yang dimana lokasi ini banyak dipengaruhi oleh kegiatan antropogenik sebagai sumber pencemar di perairan (Ashar *et al.*, 2025; Sahri *et al.*, 2021; Suyatna *et al.*, 2019; Syafira *et al.*, 2023; Tarigan *et al.*, 2017). Dikarenakan lokasi penangkapan sampel ikan berada di bagian luar Teluk Balikpapan, diduga konsentrasi As, Cu, Mn dan Zn dari aktivitas antropogenik dari pesisir Balikpapan dan sekitarnya telah mengalami pengenceran akibat faktor arus, gelombang, serta pasang surut perairan baik dari Teluk dan juga Selat Makassar. Dugaan ini didukung oleh hasil investigasi yang menyatakan bahwa distribusi logam di perairan dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti sumber logam, jarak dari mulut sungai dan juga kondisi hidro-osenografi seperti arus, gelombang dan pasang surut perairan (Liu *et al.*, 2023; Zhu *et al.*, 2024). Selain itu, dikarenakan spesies *R. kanagurta* ini merupakan ikan pelagis, bergerombol (*schooling*), dan karnivor yang memangsa phytoplankton, zooplankton, teri, udang, cacing, diatom, gastropoda dan cumi – cumi (Hakimelahi *et al.*, 2020; Hasibuan *et al.*, 2025), maka dapat diduga bahwa jenis mangsa dari ikan ini mungkin memiliki kandungan logam yang relatif rendah. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengukur kandungan logam berat pada berbagai biota perairan yang menjadi sumber pakan ikan tersebut di perairan Balikpapan guna memastikan dugaan ini.

Berdasarkan nilai konsentrasinya, ditemukan bahwa Fe dan Zn merupakan logam dominan yang terakumulasi dalam jaringan otot ikan di lokasi penelitian. Jika dibandingkan, konsentrasi Fe lebih tinggi 25 kali dibanding Mn di penelitian ini. Tingginya konsentrasi Fe dan Zn pada otot *R. kanagurta* di penelitian ini menunjukkan bahwa kedua logam tersebut merupakan elemen yang penting dan dibutuhkan oleh aktifitas fisiologi dan metabolisme ikan. Elemen Fe penting untuk transportasi oksigen melalui hemoglobin serta terlibat dalam berbagai reaksi enzimatik, sedangkan elemen Zn sangat penting untuk pertumbuhan, reproduksi, fungsi kekebalan tubuh, dan

pertahanan antioksidan (Asad *et al.*, 2023; Vali *et al.*, 2025). Jika dibandingkan, konsentrasi Fe pada otot ikan kembung di penelitian ini lebih rendah dibandingkan dengan nilai yang ditemukan pada otot ikan kembung dari daerah lain seperti Digha, West Bengal, India (Emiroglu & Tarkan (2012), dari daerah Jakarta Utara (Mulyaningsih, 2014) dan juga Dar es Salaam Tanzania (Mziray & Kimirei, 2016). Secara umum, nilai As di penelitian ini relatif lebih rendah dibandingkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Putri *et al.*, (2017) di Teluk Jakarta, Indonesia. Tetapi, konsentrasi As lebih tinggi jika dibandingkan hasil temuan di Digha, West Bengal, India (Emiroglu & Tarkan (2012), Mulyaningsih (2014) di Jakarta Utara, Dar es Salaam Tanzania (Mziray & Kimirei, 2016) dan Perairan Balikpapan, Indonesia oleh Saleh & Busaadia (2022) (Tabel 2).

Pada dasarnya, Tembaga (Cu) adalah mikronutrien penting yang berfungsi sebagai kofaktor esensial untuk enzim-enzim kunci, seperti *sitokrom c oksidase* dan *superoksida dismutase (SOD)*, yang vital untuk respirasi seluler dan pertahanan antioksidan, serta berperan dalam sintesis hemoglobin dan metabolisme zat besi (Chun *et al.*, 2025). Walaupun demikian, asupan Cu yang berlebihan juga dapat menyebabkan keracunan akut atau kronis, menyebabkan hepatotoksitas yang dapat berkembang menjadi sirosis atau gagal hati, seperti yang teramati pada penyakit neurodegeneratif termasuk penyakit Wilson (WD), penyakit Menkes (MD), penyakit Alzheimer (AD), penyakit Parkinson (PD) (Członkowska *et al.*, 2018; Maffia *et al.*, 2020). Sebaliknya, defisiensi tembaga dapat menyebabkan anemia, neutropenia dan penyakit Alzheimer (Chun *et al.*, 2025; Squitti *et al.*, 2021). Dipenelitian ini, konsentrasi Cu relatif lebih rendah dibanding semua hasil penelitian yang ada di Tabel 2.

Konsentrasi Mn dari otot *R. kanagurta* di penelitian ini masih lebih rendah dibandingkan dengan beberapa hasil temuan, seperti Agusa *et al.*, (2007) di Teluk Lada, Indonesia, Emiroglu & Tarkan (2012) di Digha, West Bengal, India, Rahmadani (2017) di Teluk Lampung, Indonesia, dan Kimirey (2016) di Dar es Salaam Tanzania (Tabel 3). Sebagai unsur mikro esensial, Mn bertindak sebagai kofaktor bagi berbagai enzim dalam sistem biologis manusia, seperti *Mangan Superoksida Dismutase (Mn-SOD)* yang berperan sebagai pertahanan antioksidan primer di mitokondria dengan cara mereduksi radikal bebas superoksida, sehingga mencegah stres oksidatif seluler (Li & Yang, 2018). Adanya Mn pada tubuh manusia dapat menjaga homeostasis tulang, glukosa, dan neurologis. Meski demikian, asupan yang masuk ke tubuh konsumen perlu diatur dalam batas asupan harian yang direkomendasikan (1,8 – 2,3 mg untuk dewasa). Jika melebihi, mungkin Mn dapat memicu terjadinya neurotoksisitas, yang secara klinis dapat menyebabkan gejala Parkinson yakni gangguan neurodegeneratif yang menyebabkan kehilangan neuron (Khindri & Maj, 2025; Lu *et al.*, 2023).

Tabel 1. Konsentrasi As, Cu, Fe, Mn dan Zn pada otot *R. kanagurta* (mg/kg) berat kering

No sampel	As	Cu	Fe	Mn	Zn
1	0,40	0,06	0,65	0,04	0,33
2	0,03	0,06	0,42	0,01	0,36
3	0,41	0,12	0,41	0,04	0,36
4	0,40	0,06	0,57	0,02	0,35
5	0,03	0,06	0,45	0,02	0,33
6	0,39	0,13	0,47	0,02	0,37
7	0,20	0,07	0,74	0,01	0,29
8	0,01	0,07	0,50	0,01	0,31
9	0,78	0,07	0,37	0,02	0,35
Rerata ± standar deviasi	0,29 ± 0,25	0,08 ± 0,03	0,51 ± 0,12	0,02 ± 0,01	0,34 ± 0,03
MFR (1985)	-	-	-	-	100
China (2001)	0,50	50,0	-	-	-
BPOM (2009)	1,00	-	1,00	-	-

Keterangan: Tanda "-" adalah tidak ada nilai.

Tabel 2. Perbandingan konsentrasi logam pada otot *R. kanagurta* (mg/kg berat kering) dengan penelitian lain

Lokasi	n	As	Cu	Fe	Mn	Zn	Referensi
Teluk Lada, Indonesia ^a	3	-	9,31	-	2,30	96,3	Agusa <i>et al.</i> , (2007)
Digha, West Bengal, India ^a	8	0,52 ± 0,13	1,9 ± 0,4	32,4 ± 8,3	0,9 ± 0,2	18,3 ± 2,7	Emiroglu & Tarkan (2012)
Jakarta Utara, Indonesia ^a	-	3,46 ± 0,41	-	63,7 ± 15,8	-	23,98 ± 2,26	Mulyaningsih (2014)
Muara Angke, Indonesia	10	tt ^d *	-	-	-	-	Rahayu <i>et al.</i> , (2014)
Teluk Jakarta, Indonesia ^a	3	0,08 ± 0,00	-	-	-	-	Putri <i>et al.</i> , (2017)
Teluk Lampung, Indonesia ^a	-	-	0,90	-	1,121	-	Rahmadani (2017)
Dar es Salaam Tanzania	50	12,1	9,17	125	2,79	104	Mziray & Kimirey (2016)
Pantai Barat, Yaman	40	0,52 – 1,52	0,60 – 4,50	-	-	2,70 – 40,5	Saleh & Busaadia (2022)
Perairan Balikpapan, Indonesia ^a	9	0,29 ± 0,25	0,08 ± 0,03	0,51 ± 0,12	0,02 ± 0,01	0,34 ± 0,03	Penelitian ini

Keeterangan: n = jumlah sampel . *tt^d = tidak terdeteksi. Tanda "-" adalah tidak ada nilai. ^a = Konsentrasi berat kering.

Pada dasarnya Zn secara fundamental merupakan salah satu mikronutrien penting di berbagai proses fisiologis, termasuk sintesis protein dan metabolisme energi pada manusia dan hewan (Prasad, 2014). Selain itu, logam ini juga berperan sebagai kofaktor vital bagi lebih dari 300 enzim, tubuh organisme, termasuk moluska, secara homeostatis mempertahankan kadar seng yang relatif tinggi (Hara *et al.*, 2017). Di penelitian ini, konsentrasi Zn yang terdeteksi pada jaringan otot *R. kanagurta* menunjukkan nilai yang lebih rendah jika dibandingkan dengan temuan pada spesies yang sama di berbagai lokasi, seperti Teluk Lada, Indonesia (Agusa *et al.*, 2007), Digha, India (Emiroglu & Tarkan, 2012), Jakarta Utara, Indonesia (Mulyaningsih, 2014), Dar es Salaam, Tanzania (Mziray & Kimirei, 2016), serta Pantai Barat, Yaman (Saleh & Busaadia, 2022) (Tabel 2). Meskipun Zn merupakan unsur esensial yang lazim ditemukan dalam makanan, asupan berlebihan dapat menimbulkan efek toksik, seperti gangguan keseimbangan elektrolit, gejala gastrointestinal (mual), anemia, dan letargi (Plum *et al.*, 2010). Sebaliknya, defisiensi Zn yang dapat disebabkan oleh asupan makanan tidak adekuat, konsumsi alkohol kronis, atau gangguan malabsorpsi, berpotensi menyebabkan masalah klinis seperti gangguan pertumbuhan atau *stunting*, hipogonadisme, imunitas dan juga akrodermatitis (Chen *et al.*, 2024; Roohani *et al.*, 2013).

Penilaian risiko terhadap konsentrasi As, Cu, Fe, Mn, dan Zn dalam satuan mg/kg pada jaringan daging kembung disajikan pada tabel 3. Ditemukan bahwa nilai PAH tertinggi untuk seluruh logam ditemukan pada kelompok anak-anak, diikuti oleh remaja, dan terendah pada kelompok dewasa. Sebagai contoh, nilai PAH untuk arsen (As) pada kelompok anak-anak mencapai $1,64 \times 10^{-3}$ mg/kg berat badan/hari, sementara pada kelompok dewasa hanya $6,38 \times 10^{-4}$ mg/kg berat badan/hari. Meskipun demikian, seluruh nilai PAH dalam penelitian ini masih jauh di bawah nilai *Provisional Tolerable Daily Intake (PTDI)* yang ditetapkan oleh *The Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA)* untuk masing-masing logam.

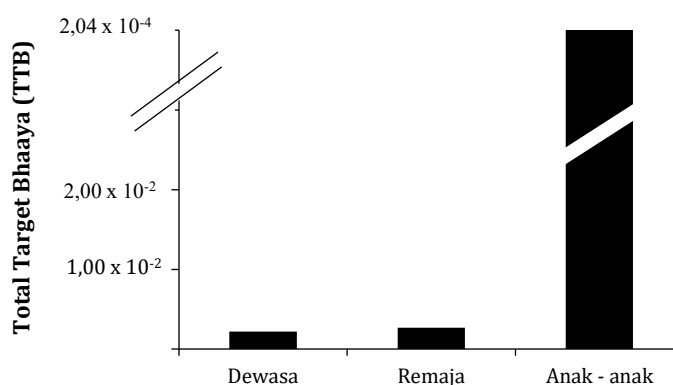
Semua nilai target bahaya (TB) (Tabel 3) dan total target bahaya (TTB) (Gambar 2) masih jauh lebih rendah dari satu (TB dan TTB < 1). Berdasarkan kajian risiko, rendahnya nilai TB dan TTB kurang dari 1 (TB/TTB < 1) di penelitian ini menunjukkan bahwa ikan kembung yang berasal dari Teluk Balikpapan masih relatif aman dikonsumsi dan mungkin tidak memberikan efek non-karsinogenik terhadap kesehatan di semua tingkat usia baik dewasa, remaja maupun anak - anak. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Marshanda *et al.* (2026), yang melaporkan bahwa kandungan Pb dan Cd pada ikan kembung dari perairan Balikpapan tidak menimbulkan risiko kesehatan bagi konsumen dari berbagai kelompok usia. Walaupun demikian, para konsumen

khususnya kategori usia anak - anak harus berhati - hati mengkonsumsi ikan kembung ini secara terus menerus. Hal ini terjadi karena variasi risiko berdasarkan kelompok usia menunjukkan pola yang konsisten di mana nilai PAH dan TB tertinggi selalu ditemukan pada kelompok anak-anak, diikuti oleh remaja, dan terendah pada dewasa. Jika spesies ikan ini dikonsumsi secara berlebihan, maka risiko kesehatan tubuh mereka semakin meningkat. Karenanya, kerjasama antar lembaga terkait dengan paparan, risiko dan manfaat konsumsi *R. kanagurta* dari perairan Balikpapan harus dilakukan dengan melibatkan berbagai pihak seperti pihak pemerintah seperti Dinas Lingkungan Hidup, Perikanan dan Kelautan, Dinas Kesehatan, non- pemerintah (NGO), industri, akademisi, dan juga masyarakat lokal.

Tabel 3. Nilai Perkiraan Asupan Harian (PAH) dan Target Bahaya (TB) pada *R. Kanagurta*

Jenis logam	Kisaran konsentrasi (mg/kg)	Individu	PAH (mg/kg berat badan perhari)	TB
As	0,01 - 0,78	Dewasa (≥ 18 tahun)	$6,38 \times 10^{-4}$	$2,13 \times 10^{-3}$
		Remaja (11 - 17 tahun)	$7,81 \times 10^{-4}$	$2,60 \times 10^{-3}$
		Anak – anak (<10 tahun)	$1,64 \times 10^{-3}$	$2,00 \times 10^{-1}$
Cu	0,06 - 0,13	Dewasa (≥ 18 tahun)	$1,71 \times 10^{-4}$	$4,28 \times 10^{-5}$
		Remaja (11 - 17 tahun)	$2,10 \times 10^{-4}$	$5,24 \times 10^{-5}$
		Anak – anak (<10 tahun)	$4,41 \times 10^{-4}$	$4,02 \times 10^{-3}$
Fe	0,37 - 0,74	Dewasa (≥ 18 tahun)	$1,11 \times 10^{-3}$	$1,58 \times 10^{-6}$
		Remaja (11 - 17 tahun)	$1,35 \times 10^{-3}$	$1,93 \times 10^{-6}$
		Anak – anak (<10 tahun)	$2,85 \times 10^{-3}$	$1,48 \times 10^{-4}$
Mn	0,01 - 0,04	Dewasa (≥ 18 tahun)	$4,67 \times 10^{-5}$	$3,33 \times 10^{-7}$
		Remaja (11 - 17 tahun)	$5,71 \times 10^{-5}$	$4,08 \times 10^{-7}$
		Anak – anak (<10 tahun)	$1,20 \times 10^{-4}$	$3,13 \times 10^{-5}$
Zn	0,29 - 0,37	Dewasa (≥ 18 tahun)	$7,35 \times 10^{-4}$	$2,45 \times 10^{-6}$
		Remaja (11 - 17 tahun)	$8,99 \times 10^{-4}$	$3,00 \times 10^{-6}$
		Anak – anak (<10 tahun)	$1,89 \times 10^{-3}$	$2,30 \times 10^{-4}$

Nilai PTDI dari masing – masing logam yakni As adalah 2.14; Cu (500); Fe (800); Mn (0,04) dan Zn (1000) dalam satuan mg/kg berat badan perhari berdasarkan *The Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives* (JECFA, 1999, 2003).



Gambar 2. Nilai total target bahaya (TTB) pada *R. kanagurta*

KESIMPULAN

Konsentrasi As, Cu, Fe, Mn, dan Zn dalam otot ikan kembung (*Rastrelliger kanagurta*) dari perairan Balikpapan masih berada di bawah standar keamanan pangan nasional dan internasional (MFR, 1985; China, 2001; BPOM, 2009; CCFAC, 2011). Urutan konsentrasi logam dari tertinggi ke terendah adalah Fe > Zn > As > Cu > Mn. Nilai Asupan Harian (PAH) untuk setiap logam pada kelompok usia dewasa, remaja, dan anak-anak lebih rendah dari nilai *Provisional Tolerable Daily Intake (PTDI)* yang direkomendasikan oleh JECFA. Ikan kembung dari perairan Balikpapan masih relatif aman dikonsumsi dan tidak menimbulkan risiko kesehatan non – karsinogenik terhadap konsumen. Namun, faktor jumlah frekuensi konsumsi ikan, terutama pada anak-anak harus lebih diperhatikan. Selain itu, kegiatan pemantauan berkala terhadap kualitas perairan dan biota laut di perairan Balikpapan harus dilakukan untuk mencegah potensi akumulasi logam berat di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

- Agusa, T., Kunito, T., Sudaryanto, A., Monirith, I., Kan-Atireklap, S., Iwata, H., Ismail, A., Sanguansin, J., Muchtar, M., Tana, T. S., & Tanabe, S. (2007). Exposure Assessment for Trace Elements from Consumption of Marine Fish in Southeast Asia. *Environmental Pollution*, 145(3), 766–777. doi: 10.1016/j.envpol.2006.04.034
- Ahmad, A., Lim, A., Khiok, P., Nor Azman, Z., Mohd Saki, N., & Tassapon, K. (2018). Marine fishes and crustaceans of the Southeast Asian Region. *SEAFDEC/MFRDMD/SP/40*, 238 pp. Marine Fishery Resources Development and Management Department. fian, R. L., Iskandar, J., Iskandar, B. S., Suroso, Ermandara, D. P., Mulyanto, D., & Partasasmita, R. (2020). Fish Species, Traders, and Trade in Traditional Market: Case Study in Pasar Baru, Balikpapan City, East Kalimantan, Indonesia. *Biodiversitas*, 21(1), 393–406. doi: 10.13057/biodiv/d210146
- Andini, A. D., Paputungan, M. S., Suryana, I., & Ritonga, I. R. (2024). Konsentrasi Kadmium (Cd) pada Kerang Darah (*Anadara granosa*) dari Beberapa Pasar Tradisional di Kota Samarinda, dan Potensi Risikonya Terhadap Kesehatan Manusia. *Buletin Oseanografi Marina*, 13(3), 351–362. doi: 10.14710/buloma.v13i3.63526
- Asad, F., Batool, N., Nadeem, A., Bano, S., Anwar, N., Jamal, R., & Ali, S. (2023). Fe-NPs and Zn-NPs: Advancing Aquaculture Performance Through Nanotechnology. *Biological Trace Element Research*, 202(6), 2828–2842. doi: 10.1007/s12011-023-03850-6
- Ashar, A. A. A., Paputungan, M. S., Hamdhani, H., & Ritonga, I. R. (2025). Analisis Konsentrasi Fe, Mn, dan Zn pada Sedimen Mangrove di Sepanjang Sungai Sember Kota Balikpapan. *Jurnal Perikanan*, 15(1), 387–397. doi: 10.29303/jp.v15i1.1408
- Bahurmiz, O. M., Adzitey, F., & Ng, W. K. (2017). Nutrient and Fatty Acid Composition of the Flesh of Oil Sardine (*Sardinella longiceps*) and Indian mackerel (*Rastrelliger kanagurta*) from Hadhramout Coast of the Arabian Sea, Yemen. *International Food Research Journal*, 24(6), 2387–2393.
- BPOM. (2009). Penetapan batas maksimum cemaran mikroba dan kimia dalam makanan. *Badan Standardisasi Nasional* (HK.00.06.1.52.4011). [https://codexindonesia.bsn.go.id/uploads/download/Regulasi Pangan BPOM No HK.00.06.1.52.4011.pdf](https://codexindonesia.bsn.go.id/uploads/download/Regulasi%20Pangan%20BPOM%20No%20HK.00.06.1.52.4011.pdf)
- BPS. (2023). Angka harapan hidup (AHH) menurut provinsi dan jenis kelamin (tahun), 2020-2022. Badan Pusat Statistik. <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/NTAxzl=/angka-harapan-hidup--ahh--menurut-provinsi-dan-jenis-kelamin--tahun-.html>
- Chen, B., Yu, P., Chan, W. N., Xie, F., Zhang, Y., Liang, L., Leung, K. T., Lo, K. W., Yu, J., Tse, G. M. K., Kang, W., & To, K. F. (2024). Cellular Zinc Metabolism and Zinc Signaling: from Biological Functions to Diseases and Therapeutic Targets. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 9(1), 1–41. doi: 10.1038/s41392-023-01679-y
- Chun, N., Aman, S., Xu, D., Wang, J., Zuppan, C., & Kheradpour, A. (2025). Anemia Due to Unexpected Zinc-Induced Copper Deficiency. *Hematology Reports*, 17(4), 1–8. doi: 10.3390/hematolrep17040035

- Czlonkowska, A., Litwin, T., Dusek, P., Ferenci, P., Lutsenko, S., Medici, V., Rybakowski, J. K., Weiss, K. H., & Schilsky, M. L. (2018). Nature Reviews Disease Primers article: Wilson disease. *Nature Reviews Disease Primers*, 4(1), 21. doi: 10.1038/s41572-018-0018-3
- Emiroğlu, Ö., & Tarkan, A. S. (2012). Growth and Life History Traits of a Highly Exploited Population of Non-Native Gibel Carp, *Carassius gibelio* from a Large Eutrophic Lake (Lake Uluabat, NW Turkey): is Reproduction the Key Factor for Establishment Success? *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 12(4), 925–936. doi: 10.4194/1303-2712-v12
- Hakimelahi, M., Savari, A., Doustshenas, B., Ghodrati Shojaei, M., & Lewis, K. A. (2020). Food and Feeding Habits of Indian Mackerel (*Rastrelliger kanagurta*) in the Southern Part of Qeshm Island, Persian Gulf. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 19(2), 563–573. doi: 10.22092/IJFS.2018.120058
- Hasibuan, J. S., Panggabean, R. C., Susetya, I. E., Manurung, V. R., & Fadhilah, A. (2025). Food Habit of Indian mackerel (*Rastrelliger kanagurta*) Landed at the Pantai Labu Fishing Port (TPI) Deli Serdang Regency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1445(1), 012094. doi: 10.1088/1755-1315/1445/1/012094
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, Mechanism and Health Effects of Some Heavy Metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7(2), 60–72.
- JECFA. (1999). Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Reports of the 53rd Meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). No Title JECFA/53/TRS, Rome, Italy.
- JECFA. (2003). Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Summary and Conclusions of the 61st Meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). JECFA/61/SC.
- Khindri, N., & Maj, M. (2025). Manganese-Induced Parkinsonism: A Review of Etiologies and Treatments. *Degenerative Neurological and Neuromuscular Disease*, 15, 65–79. doi: 10.2147/dnnd.s482018
- Liu, T., Zhu, L., Bao, R., Hu, R., Jiang, S., Zhu, Y., & Song, Y. (2023). Hydrodynamically-Driven Distribution and Remobilization of Heavy Metals in Surface Sediments Around the Coastal Area of Shandong Peninsula, China. *Science of The Total Environment*, 857, 159286. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159286
- Lu, M., Deng, P., Yang, L., Wang, X., Mei, X., Zhou, C., Chen, M., Zhou, Z., Pi, H., Wu, L., & Yu, Z. (2023). Manganese Overexposure Induces Parkinson-Like Symptoms, Altered Lipid Signature and Oxidative Stress in C57BL/6 J Mouse. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 263, 115238. doi: 10.1016/j.ecoenv.2023.115238
- Maffia, M., Greco, M., Rizzo, F., Garzarelli, V., Intini, V., Maffia, M. C., Danieli, A., Vergara, D., & De Riccardis, L. (2020). Copper Dyshomeostasis In Neurodegenerative Diseases. *Acta Physiologica*, 21, 9259.
- Marsanda, Nurfadilah, & Ritonga, I. R. (2026). Analisis Kandungan Logam Cadmium (Cd) dan Timbal (Pb) pada Ikan Kembung (*Rastrelliger kanagurta*) yang Ditangkap di Perairan Balikpapan. *Buletin Oseanografi Marina*, 15(2), 327–340. doi: 10.14710/buloma.v15i2.77910
- Muljati, S., Triwinarto, A., Utami, N., & Hermina. (2016). Gambaran Median Tinggi Badan Dan Berat Badan Menurut Kelompok Umur Pada Penduduk Indonesia Yang Sehat Berdasarkan Hasil Risesdas 2013. *Penelitian Gizi Dan Makanan (The Journal of Nutrition and Food Research)*, 39(2), 137–144.
- Mulyaningsih, T. R. (2014). Monitoring Logam Berat Dalam Ikan Laut dan Air Tawar dan Evaluasi Nutrisi Dari Konsumsi Ikan. *Jurnal Iptek Nuklir Ganendra*, 17(1), 9–15. doi: 10.17146/gnd.2014.17.1.1295
- Mziray, P., & Kimirei, I. A. (2016). Bioaccumulation of Heavy Metals in Marine Fishes (*Siganus sutor*, *Lethrinus harak*, and *Rastrelliger kanagurta*) from Dar es Salaam Tanzania. *Regional Studies in Marine Science*, 7, 72–80. doi: 10.1016/j.rsma.2016.05.014
- National Standards Management Department of China. (2001). General Administration of Quality Supervision. Safety Qualification for Agricultural Product-Safety Requirements for Non-environmental Pollution Aquatic Products (GB 18406.4-2001). China Standards Press: Beijing, China.

- Plum, L. M., Rink, L., & Hajo, H. (2010). The Essential Toxin: Impact of Zinc on Human Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7(4), 1342–1365. doi: 10.3390/ijerph7041342
- Putri, A. K., Barokah, G. R., & Andarwulan, N. (2017). Human Health Risk Assessment of Heavy Metals Bioaccumulation In Fish and Mussels from Jakarta Bay. *Squalen Bulletin of Marine and Fisheries Postharvest and Biotechnology*, 12(2), 75. doi: 10.15578/squalen.v12i2.286
- Rahayu, S. M., Suseno, S. H., & Ibrahim, B. (2014). Proximate, Latty Acid Profile and Heavy Metal Content of Selected by Catch Fish Species from Muara Angke, Indonesia. *Pakistan Journal of Nutrition*, 13(8), 480–485. doi: 10.3923/pjn.2014.480.485
- Rahmadani, R. (2017). Kajian Kandungan Beberapa Logam Berat Pada Ikan Kembung (*Restrelliger kanagurta*) Di Pesisir Teluk Lampung Secara Spektrofotometri Serapan Atom [Universitas Lampung]. <http://digilib.unila.ac.id/28776/>
- Ray, S., & Vashishth, R. (2024). From Water to Plate: Reviewing the Bioaccumulation of Heavy Metals in Fish and Unraveling Human Health Risks in the Food Chain. *Emerging Contaminants*, 10(4), 100358. doi: 10.1016/j.emcon.2024.100358
- Regulations, M. F. (1985). Food act 1983 (Act 281) & regulations. In International Law Book Services: Kuala Lumpur, Malaysia.
- Roohani, N., Hurrell, R., Kelishadi, R., & Schulin, R. (2013). Zinc and Its Importance for Human Health: An Integrative Review. *Journal of Research in Medical Sciences*, 18(2), 144–157.
- Sahri, A., Herwata Putra, M. I., Kusuma Mustika, P. L., Kreb, D., & Murk, A. J. (2021). Cetacean Habitat Modelling to Inform Conservation Management, Marine Spatial Planning, and as a Basis for Anthropogenic Threat Mitigation in Indonesia. *Ocean and Coastal Management*, 205, 105555. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2021.105555
- Saleh, Y. S., & Busaadia, M. A. (2022). Dietary Metal Intake from Four Widely Consumed Marine Fish Species and Its Repercussions for Human Health at the West Coast of Yemen. *Regional Studies in Marine Science*, 50, 102153. doi: 10.1016/j.rsma.2021.102153
- Satriawan, E. F., Marsanda, M., Saputra, M. I., Paputungan, M. S., Suryana, I., & Ritonga, I. R. (2026). Cemaran Logam Berat pada Kerang Darah (*Anadara granosa*) dari Perairan Babulu Laut Penajam Paser Utara dan Risiko Terhadap Kesehatan Manusia. *Buletin Oseanografi Marina*, 15(2), 305–315. doi: 10.14710/buloma.v15i2.82217
- Sitorus, S., Ilang, Y., & Nugroho, R. A. (2020). Analisis Kadar Logam Pb, Cd, Cu, As pada Air, Sedimen dan Bivalvia di Pesisir Teluk Balikpapan. *Dinamika Lingkungan Indonesia*, 7(2), 89. doi: 10.31258/dli.7.2.p.89-94
- Squitti, R., Faller, P., Hureau, C., Granzotto, A., White, A. R., & Kepp, K. P. (2021). Copper Imbalance in Alzheimer's Disease and Its Link with the Amyloid Hypothesis: Towards a Combined Clinical, Chemical, and Genetic Etiology. *Journal of Alzheimer's Disease*, 83(1), 23–41. doi: 10.3233/JAD-201556
- Suyatna, I., Riadi, R. I., Feriyanto, I. J., Ghitarina, Gunawan, B. I., Sasono, R. R., & Rafii, A. (2019). Determination of Water Quality Condition from Water Samples Around Location of Ship to Ship Transfer of Coal in Balikpapan, East Kalimantan, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 348(1), 012067. doi: 10.1088/1755-1315/348/1/012067
- Syafira, A. R., Ritonga, I. R., Paputungan, M. S., & Suryana, I. (2023). Analisis kandungan Timbal (Pb) pada sedimen mangrove di kawasan Mangrove Center Graha Indah, Balikpapan, Kalimantan Timur. *Jurnal Perikanan Unram*, 13(1), 220–231. doi: 10.29303/jp.v13i1.465
- Tanhan, P., Lansubsakul, N., Phaochoosak, N., Sirinupong, P., Yeesin, P., & Imsilp, K. (2023). Human Health Risk Assessment of Heavy Metal Concentration in Seafood Collected from Pattani Bay, Thailand. *Toxics*, 11(18), 1–18. doi: 10.3390/toxics11010018
- Tarigan, A. K. M., Samsura, D. A. A., Sagala, S., & Wimbardana, R. (2017). Balikpapan: Urban Planning and Development in Anticipation of the Post Oil Industry Era. *Cities*, 60, 246–259. doi: 10.1016/j.cities.2016.09.012
- Taylor, A. A., Tsuji, J. S., McArdle, M. E., Adams, W. J., & Goodfellow, W. L. (2023). Recommended Reference Values for Risk Assessment of Oral Exposure to Copper. *Risk Analysis*, 43(2), 211–218. doi: 10.1111/risa.13906
- USEPA. (2023). Regional Screening Levels (RSLs) - User's Guide May 2023. <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-users-guide>

- Vali, R., Shirvanian, K., Farkhondeh, T., Aschner, M., Samini, F., & Samarghandian, S. (2025). A Review Study on the Effect of Zinc on Oxidative Stress-Related Neurological Disorders. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 88, 127618. doi: 10.1016/j.jtemb.2025.127618
- Zhu, W. Z., Cai, J. C., Ma, W. W., Li, B., & Feng, W. H. (2024). Distribution, Sources and Risk Assessment of Heavy Metals in Yangshan Port and Its Adjacent Sea Areas. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1–16. doi: 10.3389/fmars.2024.1512115