

Analisis Pencemaran Mikroplastik dalam Ikan Tongkol (*Euthynnus affinis*) di Perairan Semenanjung Malaysia (Analysis of Microplastic Pollution in Kawakawa Fish (*Euthynnus affinis*) in the Waters of Peninsular Malaysia)

SINORETHA SINING¹, ADLIN I. ARBA'IN¹, MAISARAH I. AMIZURI¹, AZWAN MAT LAZIM², FUAD M. MISKON³, FIKRIAH FAUDZI⁴, MAZLAN ABD. GHAFFAR^{5,6} & SYAFIQ M. MUSA^{1,7,*}

¹Marine Science Programme, Department of Earth Sciences and Environment, Faculty of Science and Technology, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

²Department of Chemical Sciences, Faculty of Science and Technology, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

³Institute of Oceanography and Maritime Studies, International Islamic University Malaysia (Kuantan Campus), 25200 Kuantan, Pahang, Malaysia

⁴Department of Marine Science, International Islamic University Malaysia (Kuantan Campus), 25200 Kuantan, Pahang, Malaysia

⁵Faculty of Science and Marine Environment, Universiti Malaysia Terengganu, 21030 Kuala Terengganu, Terengganu, Malaysia

⁶UMT-OUC Joint Academic Center for Marine Studies, Institute of Climate Adaptation and Marine Biotechnology (ICAMB), Universiti Malaysia Terengganu, 21030 Kuala Terengganu, Terengganu, Malaysia

⁷Marine Ecosystem Research Center (EKOMAR), Faculty of Science and Technology, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

Diserahkan: 8 Ogos 2024/Diterima: 16 Disember 2024

ABSTRAK

Pencemaran mikroplastik dalam persekitaran marin telah mencapai tahap yang semakin membimbangkan di seluruh dunia. Kajian mengenai pencemaran mikroplastik pada organisma marin masih kurang di Malaysia, terutama bagi spesies yang turut menjadi makanan laut dan sajian utama di Malaysia, contohnya ikan tongkol (*Euthynnus affinis*). Sebanyak 207 organ telah diekstrak keluar daripada 69 ekor ikan tongkol dengan tiga organ diambil daripada setiap ikan (iaitu saluran gastrousus, insang dan kulit) yang telah disampel dari empat kawasan pendaratan ikan utama di Malaysia, iaitu Kuala Terengganu, Terengganu; Kuantan, Pahang; Mersing, Johor; dan Kuala Selangor, Selangor. Hasil kajian menunjukkan kulit ikan tongkol mempunyai kandungan mikroplastik tertinggi (1.52 ± 0.91 mikroplastik per gram) berbanding organ insang dan saluran gastrousus. Jenis mikroplastik yang paling dominan dijumpai adalah berbentuk serat (89.95%), diikuti dengan serpihan (10.05%). Warna mikroplastik paling banyak dikenal pasti ialah hitam (61.58%) dan biru (21.39%). Julat saiz 0.01-1.00 mm merupakan saiz mikroplastik yang paling banyak dijumpai. Kelimpahan mikroplastik berkorelasi positif dengan saiz badan ikan menunjukkan kandungan mikroplastik pada ikan tongkol semakin bertambah seiring dengan pertambahan umur dan saiz badan ikan. Data kajian ini menemukan mikroplastik pada kesemua organ ikan tongkol yang dikaji, maka adalah disarankan agar kulit luaran ikan perlu dibersihkan dan organ dalaman seperti insang dan saluran gastrousus perlu disiang terlebih dahulu sebelum digunakan dalam sebarang penyediaan hidangan makanan bagi mengurangkan risiko kemasukan mikroplastik terhadap manusia melalui pemakanan ikan tongkol ini.

Kata kunci: Ikan komersial; ikan tongkol; mikroplastik; pencemaran marin

ABSTRACT

Microplastic pollution in the marine environment has reached increasingly alarming levels globally. Research on microplastic contamination in marine organisms remains limited in Malaysia, particularly for species that are also consumed as seafood and are staple dishes, such as the kawakawa fish (*Euthynnus affinis*). This study extracted a total of 207 organs from 69 kawakawa fish, with three organs (i.e., gastrointestinal tract, gills, and skin) taken from each fish sampled from four major fish landing sites in Malaysia: Kuala Terengganu, Terengganu; Kuantan, Pahang; Mersing, Johor; and Kuala Selangor, Selangor. The results showed that the skin of the kawakawa fish had the highest microplastic content (1.52 ± 0.91 microplastics per gram) compared to the gill and gastrointestinal tract organs. The predominant type of microplastic identified was fiber (89.95%), followed by fragments (10.05%). The most frequently detected colors of microplastics were black (61.58%) and blue (21.39%). Microplastics in the size range of 0.01-1.00 mm were the most commonly found. There

was a positive correlation between the abundance of microplastics and the body size of the fish, indicating that microplastic content in kawakawa fish increases with age and body size. The data from this study found microplastics in all the organs of the kawakawa fish examined, therefore, it is recommended that the outer skin of kawakawa fish be thoroughly cleaned, and internal organs such as the gills and gastrointestinal tract be gutted before being used in any food preparation to reduce the risk of microplastic ingestion by humans through the consumption of this fish.

Keywords: Commercial fish; kawakawa fish; marine pollution; microplastic

PENGENALAN

Sisa sampah plastik telah meningkat secara mendadak dalam beberapa dekad kebelakangan ini, sehingga merangkumi 95% daripada jumlah sisa pepejal yang terkumpul di persekitaran marin (Ryan 2015; Topçu et al. 2013). Melalui gabungan daya mekanikal, seperti pukulan ombak laut, dan proses fotokimia yang berpunca daripada sinaran UV daripada cahaya matahari, sisa plastik ini kemudiannya terurai menjadi serpihan plastik kecil yang turut dikenali sebagai mikroplastik, iaitu zarah plastik bersaiz kurang daripada 5 mm (Bergmann, Gutow & Klages 2015; Roy et al. 2011). Kehadiran mikroplastik di dalam ekosistem marin kini menjadi kebimbangan global dengan kesannya yang meluas terhadap hidupan laut dan kesihatan manusia (Betts 2008; Hale et al. 2020).

Organisma marin, termasuk ikan, boleh tercemar melalui pendedahan terhadap air yang mengandungi mikroplastik atau melalui pemakanan kerana mikroplastik sering disalah anggap sebagai makanan (Browne 2015; Wright & Kelly 2017). Kajian saintifik menunjukkan bahawa pengambilan mikroplastik secara berlebihan boleh menyebabkan kesan toksikologi dan fizikal yang berbahaya terhadap hidupan marin (Rochman et al. 2013; Vital et al. 2021). Selain daripada kesan secara langsung terhadap hidupan marin, mikroplastik turut menjadi vektor bagi bahan pencemar toksik yang berpotensi dipindahkan daripada tahap trofik rendah ke tahap trofik lebih tinggi melalui hubungan pemangsa dan mangsa (Egbeocha et al. 2018).

Ikan tongkol (*Euthynnus affinis*) yang dikenali sebagai aya kurik oleh masyarakat tempatan merupakan spesies pelagik komersial yang penting dan terdapat secara meluas di habitat tropika dan kawasan Indo-Pasifik (Collette 2001). Sebagai haiwan pemangsa yang berada di tahap trofik tertinggi dalam rantai makanan marin, ikan tongkol memainkan peranan penting dalam ekosistem laut (Nootmorn et al. 2008). Mikroplastik yang terdapat dalam pemangsa apeks ini bukan sahaja berpunca daripada pengambilan terus mikroplastik daripada persekitaran, akan tetapi turut boleh dicemari melalui pemakanan ikan kecil yang telah tercemar dengan mikroplastik (Van Colen et al. 2020). Ini selaras dengan kajian yang menunjukkan bahawa mikroplastik cenderung untuk terkumpul dalam kuantiti yang lebih tinggi pada organisma yang berada pada tahap trofik yang lebih tinggi (Bergmann, Gutow & Klages 2015; Lusher et al. 2016). Mikroplastik telah ditemui bukan sahaja dalam saluran gastrousus (GIT) ikan,

malah turut ditemui dalam tisu lain seperti insang, hati, otot dan kulit (Sarijan et al. 2019).

Malaysia sebagai negara yang berada di garisan khatulistiwa dan di kelilingi lautan, bergantung kepada industri makanan laut sebagai sumber protein utama. Spesies marin komersial seperti ikan tongkol bukan sahaja penting bagi ekosistem laut, akan tetapi spesies ini juga merupakan sumber makanan utama bagi manusia (Smith et al. 2018). Statistik menunjukkan rakyat Malaysia adalah antara pemakan makanan laut tertinggi di dunia, dengan purata sebanyak 59 kg per kapita setahun pada 2016 (FAO 2018). Tambahan pula, spesies seperti ikan tongkol turut menjadi bahan utama dalam masakan tempatan seperti nasi dagang dan ikan singgang, menunjukkan kepentingannya dalam budaya pemakanan masyarakat di Malaysia (Aziz et al. 2020). Namun begitu, pengambilan ikan yang tercemar dengan mikroplastik berpotensi membawa mikroplastik dan bahan pencemar toksik ke dalam tubuh manusia, seterusnya berpotensi tinggi memberikan kesan negatif terhadap kesihatan manusia (Smith et al. 2018). Disebabkan oleh itu, objektif kajian ini adalah untuk mengkaji kehadiran mikroplastik dalam ikan tongkol sebagai spesies komersial utama dan menilai tahap kemasukan mikroplastik melalui organ berbeza seperti saluran gastrousus (GIT), insang dan kulit ikan.

BAHAN DAN KAEDAH

Secara keseluruhan, sebanyak 207 sampel organ telah diekstrak keluar daripada 69 ekor ikan tongkol (*Euthynnus affinis*); dengan tiga sampel organ berbeza, iaitu saluran gastrousus (GIT), insang dan kulit telah dikeluarkan daripada setiap ekor ikan yang digunakan dalam kajian ini. Sampel ikan tongkol telah didapati dari empat lokasi pendaratan ikan utama yang berbeza di Malaysia, iaitu dari Kuala Selangor, Selangor, Mersing, Johor, Kuala Terengganu, Terengganu, dan Kuantan, Pahang. Perincian jumlah sampel ikan tongkol yang diperolehi dari setiap lokasi kajian tersebut adalah seperti yang dinyatakan dalam Jadual 1. Kerja persampelan telah dilakukan beberapa kali pada masa yang berbeza bagi setiap lokasi kajian bertujuan mengambil kira perubahan temporal dalam pencemaran mikroplastik di setiap lokasi.

Sampel ikan tongkol ini telah ditimbang menggunakan penimbang digital bagi mendapatkan berat keseluruhan badan ikan. Seterusnya, panjang keseluruhan badan ikan, iaitu dari hujung muncung kepala ikan ke hujung sirip kaudal dan panjang piawai, iaitu dari hujung mulut ikan

JADUAL 1. Jumlah sampel ikan tongkol dari lokasi kajian berbeza

Lokasi persampelan	Jumlah ikan (N)
Kuala Selangor, Selangor	18
Mersing, Johor	11
Kuala Terengganu, Terengganu	20
Kuantan, Pahang	20

ke kaudal pedunkal telah diukur menggunakan pita ukur. Kajian ini memfokuskan pada tiga jenis organ utama ikan tongkol, iaitu saluran gastrousus (GIT), insang dan kulit yang berpotensi tinggi terdedah kepada pencemaran mikroplastik. Dengan menggunakan pisau pembedahan yang disteril, pembedahan sampel ikan telah dilakukan dari bahagian anus hingga ke bahagian kepala bertujuan bagi mengeluarkan sampel organ GIT dan insang ikan, manakala hanya sebahagian sampel kulit (sekitar 5 cm²) telah dipotong dan diambil daripada bahagian luar badan ikan tongkol. Kemudiannya, setiap organ yang telah diekstrak keluar ini ditimbang bagi mendapatkan berat basah bagi setiap sampel organ.

Bagi proses pencernaan sampel organ ikan tongkol ini, sampel GIT, insang dan kulit ini telah dimasukkan ke dalam botol kaca tahan haba yang mengandungi 10% kalium hidroksida (KOH) dan diinkubasi selama 72 jam pada suhu 40 °C (Jaafar et al. 2021; Karami et al. 2017). Zarah mikroplastik kekal berada di dalam botol kerana plastik tidak boleh dicerna menggunakan larutan 10% KOH. Kaedah ini memudahkan proses pengekstrakan mikroplastik daripada sampel biota kerana sampel tersebut telah dicerna (Karbalaee et al. 2019).

Selepas proses pencernaan, sampel yang telah dicerna ditapis terlebih dahulu menggunakan penapis keluli tahan karat (Endecotts Ltd., London, England) dengan saiz jaring 500 µm, 125 µm dan 63 µm yang disusun secara bertingkat dengan saiz jaring terbesar di bahagian atas (Jaafar et al. 2020). Penggunaan tiga lapis penapis keluli dengan saiz jaring yang berbeza ini bertujuan untuk memastikan pemisahan mikroplastik bersaiz kecil dapat dilakukan secara cekap, sambil menyingkirkan zarah besar yang tidak tercerna dan bahan bukan plastik. Pendekatan ini juga membantu mengelakkan risiko zarah tidak tercerna bertindih dengan mikroplastik, sekali gus memudahkan proses pengenalpastian, pengiraan dan analisis mikroplastik (Matupang et al. 2023). Setelah itu, bahan yang tertinggal pada setiap penapis keluli dibilas dengan air suling yang telah ditapis sebelum dituras menggunakan kertas turas gentian kaca (Whatman, GF/C) berdiameter 47 mm dan saiz turas 1.2 µm (Wagner et al. 2017). Proses tapisan ini dipercepatkan dengan penggunaan pam vakum (Rocker 300, Taiwan) yang dipasang pada bahagian bawah alat penuras. Mikroskop digital (Dino-Lite siri AM4113/AD4113, Taiwan) telah digunakan bagi mengenal pasti ciri fizikal mikroplastik.

Mikroskop digital ini berfungsi bersama perisian Windows OS (DinoCapture 2.0) atau MAC OS (DinoXcope). Zarah yang dipercayai sebagai mikroplastik telah dikutip menggunakan pinset muncung tirus dan diletakkan ke dalam piring petri. Bagi mendapatkan kepastian bahawa zarah tersebut adalah mikroplastik, ujian jarum panas telah dijalankan (Kapp & Yeatman 2018; Matupang et al. 2023). Ciri fizikal mikroplastik seperti saiz, warna dan morfologi/bentuk telah diperhatikan dan direkod. Pengenalpastian jenis polimer telah dilakukan menggunakan spektroskopi transformasi Fourier inframerah mikro (mikro-FTIR). Spektroskopi ini menyediakan pendekatan canggih bagi menentukan komposisi kimia zarah plastik bersaiz mikro (Deng et al. 2020). Zarah yang bersaiz kecil memerlukan penggunaan mikro-FTIR yang telah dilengkapi dengan mikroskop bagi memastikan jenis polimer mikroplastik dapat dikesan dengan baik (Chen et al. 2020).

Pelbagai langkah berjaga-jaga telah diambil sepanjang kerja makmal dijalankan untuk mengurangkan risiko pencemaran mikroplastik luaran terhadap sampel, bagi memastikan data yang diperolehi adalah lebih tepat dan boleh dipercayai. Antara langkah tersebut termasuklah memakai jubah makmal jenis kapas, memastikan semua peralatan dan radas makmal berada dalam keadaan bersih sebelum digunakan serta menggunakan sarung tangan semasa mengendalikan sampel (Jaafar et al. 2020). Proses mengeluarkan sampel organ semasa pembedahan ikan tongkol dan pengiraan sampel mikroplastik telah dijalankan di dalam kabinet aliran laminar untuk mengelakkan pencemaran mikroplastik bawaan udara. Selain itu, semua cecair yang digunakan dalam kajian, termasuk larutan KOH 10% dan air suling, telah ditapis terlebih dahulu menggunakan kertas turas gentian kaca (Whatman, diameter 150 mm, 11 µm) bagi memastikan kebersihan dan ketulenan bahan yang digunakan. Piring petri juga sentiasa ditutup apabila tidak digunakan untuk mengelakkan risiko pencemaran mikroplastik luaran daripada udara.

Sebelum analisis statistik dijalankan, ujian normaliti dan homogeniti telah dilakukan terlebih dahulu. Ujian parametrik dan bukan parametrik yang sesuai telah dipilih berdasarkan keputusan ujian tersebut bagi memastikan analisis yang lebih tepat. Data telah dianalisis menggunakan ujian ANOVA sehala bagi membandingkan kelimpahan mikroplastik yang dijumpai pada setiap individu ikan tongkol mengikut lokasi berbeza dan organ berbeza. Ujian-T telah digunakan bagi menganalisis perbandingan

kelimpahan mikroplastik antara jantina (Leads, Burnett & Weinstein 2019). Selain itu, analisis regresi linear dan korelasi Pearson telah digunakan bagi menilai hubungan antara saiz badan ikan dengan kelimpahan mikroplastik. Kesemua nilai bagi hasil kajian ini turut dinyatakan dalam purata \pm sisihan piawai.

HASIL KAJIAN DAN PERBINCANGAN

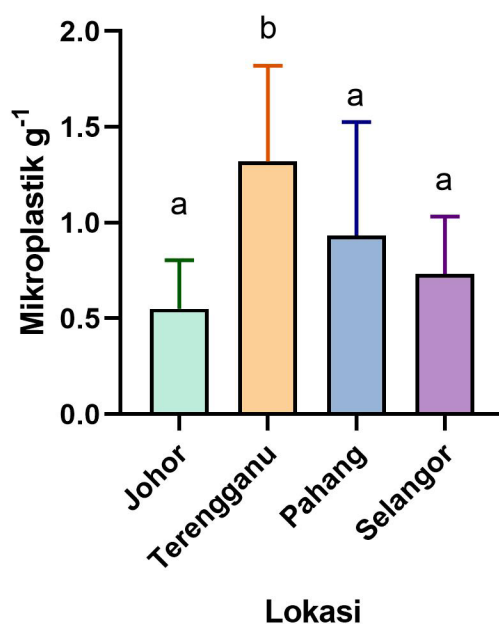
KELIMPAHAN MIKROPLASTIK MENGIKUT LOKASI KAJIAN

Sebanyak 1861 mikroplastik telah ditemui dalam sampel yang telah dikaji dengan purata jumlah mikroplastik per individu ialah 26.97 ± 9.92 (purata \pm sisihan piawai). Berdasarkan Rajah 1, kelimpahan mikroplastik dalam ikan tongkol (*E. affinis*) dari Terengganu adalah yang tertinggi berbanding lokasi kajian lain ($P < 0.05$) dengan jumlah purata sebanyak 1.32 ± 0.5 mikroplastik per gram (MP/g). Suratman dan Latif (2015) melaporkan bahawa kualiti air yang rendah dan jumlah pencemaran yang tinggi yang diperhatikan di muara Terengganu adalah disebabkan oleh peningkatan populasi penduduk dan aktiviti perindustrian di negeri tersebut. Tambahan pula, pelbagai aktiviti seperti pelancongan, perikanan, industri pemprosesan makanan laut, rekreasi, pembuatan bot dan pembinaan secara aktif berhampiran kawasan tersebut turut boleh mempengaruhi peningkatan pencemaran mikroplastik sekitar (Ibrahim & Mat Noordin 2020). Faktor hidrodinamik seperti angin, arus pasang surut dan tindakan ombak turut telah menyumbang

pada peningkatan kelimpahan mikroplastik di beberapa tapak pensampelan (Zhao et al. 2019). Di Malaysia, plastik merupakan sisa pepejal tertinggi daripada jumlah komposisi sisa pepejal perbandaran dengan peningkatan 2-3% setahun (Liang et al. 2021). Negeri-negeri yang berada di bahagian timur Semenanjung Malaysia menjana 0.71 kg/kapita/hari dengan Terengganu merekodkan pengeluaran sisa sampah plastik tertinggi (Badgie et al. 2012; Ghani et al. 2020).

KELIMPAHAN MIKROPLASTIK MENGIKUT ORGAN IKAN TONGKOL

Berdasarkan Rajah 2, mikroplastik yang dijumpai pada organ gastrousus (1.38 ± 1.29 mikroplastik per gram) mencatat kadar mikroplastik yang lebih tinggi berbanding organ insang (0.66 ± 0.52 mikroplastik per gram). Terdapat kajian lepas yang telah memperoleh keputusan yang sama, iaitu kelimpahan mikroplastik yang lebih rendah dijumpai pada insang berbanding pada gastrousus (Matupang et al. 2023; Rahmawati & Patria 2019). Ikan tongkol (*E. affinis*) ialah spesies epipelagik neritic dengan tabiat pemakanan spesies ini merupakan faktor berlakunya pengambilan mikroplastik yang tinggi yang disebabkan oleh proses pemindahan trofik makanan daripada organisma demersal (Hidalgo-Ruz et al. 2012). Ikan tuna tongkol juga merupakan spesies yang tidak selektif terhadap makanan dan merupakan pemangsa pada ikan bersirip, krustasea dan moluska (Sundaray et al. 2021). Hal ini menjelaskan faktor wujudnya mikroplastik yang tinggi dalam gastrousus ikan tongkol.



Abjad yang berbeza menunjukkan perbezaan signifikan antara kumpulan berdasarkan analisis statistik ($P < 0.05$)

RAJAH 1. Kelimpahan mikroplastik pada ikan tongkol mengikut lokasi kajian

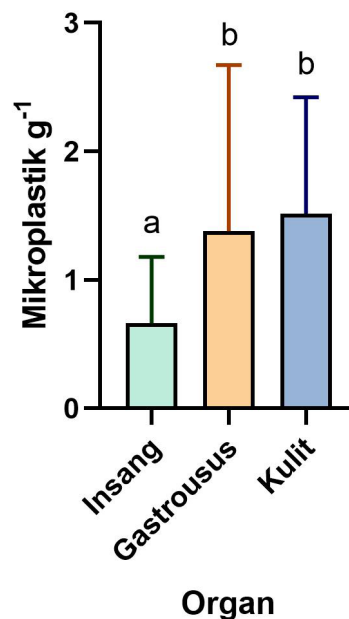
Selain itu, kelimpahan mikroplastik yang dijumpai pada kulit turut tinggi berbanding organ lain yang dikaji (Rajah 2), iaitu sebanyak 1.52 ± 0.91 mikroplastik per gram. Secara lazimnya, polimer plastik yang berada di persekitaran mempunyai ketumpatan yang lebih rendah daripada air laut, maka mikroplastik ini akan terapung pada zon pelagik (Hidalgo-Ruz et al. 2012) yang menyebabkan pelekatan mikroplastik yang tinggi pada kulit ikan akibat terdedah di persekitarannya. Berdasarkan hasil kajian lalu, kulit ikan yang dikaji turut mengandungi kelimpahan mikroplastik yang lebih tinggi berbanding organ lain (Daniel, Ashraf & Thomas 2020; Karami et al. 2017). Kandungan mikroplastik yang banyak berkemungkinan besar adalah berpunca daripada mikroplastik yang telah melekat pada kulit luaran ikan tersebut (Abbasi et al. 2018; Feng et al. 2019). Di Malaysia, pada kebiasaannya ikan yang dimakan manusia bakal disiang terlebih dahulu bagi membuang organ gastrousus, insang dan sisik luaran ikan yang mungkin mempunyai banyak kandungan mikroplastik. Akan tetapi hidangan dan sajian ikan tongkol ini lazimnya disediakan tanpa membuang kulit luarnya sebelum dimasak menjadi sajian yang popular seperti juadah Nasi Dagang. Oleh disebabkan itu, pemakanan ikan tongkol secara langsung oleh manusia tanpa membuang atau membasuh dengan bersih terlebih dahulu kulit luaran ikan tersebut bakal menimbulkan kerisauan terhadap pendedahan mikroplastik kepada manusia melalui pemakanan ikan ini. Kajian mendatang perlu difokuskan bagi mengkaji tahap kemasukan mikroplastik kepada manusia melalui pemakanan ikan ini.

KELIMPAHAN MIKROPLASTIK MENGIKUT JANTINA IKAN TONGKOL

Antara 69 ikan tongkol (*E. affinis*) yang telah dikaji, 34 ekor (49.28%) adalah jantan dan 35 ekor (50.72%) adalah betina. Berdasarkan Rajah 3, ikan tongkol jantan menunjukkan tahap kemasukan mikroplastik yang lebih tinggi berbanding betina dengan jumlah purata sebanyak 1.03 ± 0.53 mikroplastik per gram pada sampel ikan jantan, berbanding 0.83 ± 0.50 mikroplastik per gram bagi sampel ikan betina. Sbrana et al. (2020) menyebut bahawa ikan jantan mengambil lebih banyak makanan berbanding ikan betina semasa musim mengawan, maka menyebabkan kelimpahan mikroplastik pada ikan jantan adalah lebih tinggi. Bagi ikan tongkol, musim mengawan diperhatikan sepanjang tahun dengan kemuncak pada bulan Jun dan Oktober (Collette 2001; Parr et al. 2014). Oleh kerana sampel dalam kajian ini diperoleh pada sekitar musim mengawan, berkemungkinan besar tahap kelimpahan mikroplastik yang tinggi pada ikan tongkol jantan adalah disebabkan oleh perkara yang sama.

PERKAITAN ANTARA KELIMPAHAN MIKROPLASTIK DAN SAIZ IKAN TONGKOL

Rajah 4 menunjukkan hubungan antara kelimpahan mikroplastik dan panjang keseluruhan badan ikan tongkol (cm). Keputusan analisis regresi linear menunjukkan korelasi positif yang signifikan antara jumlah kelimpahan mikroplastik dan panjang keseluruhan badan ikan. Hasil kajian ini menunjukkan bahawa kelimpahan mikroplastik



Abjad yang berbeza menunjukkan perbezaan signifikan antara kumpulan berdasarkan analisis statistik ($P < 0.05$)

RAJAH 2. Kelimpahan mikroplastik mengikut organ ikan tongkol

meningkat seiring dengan pertambahan saiz badan ikan tongkol. Keputusan ini tekal dengan kajian terdahulu yang melaporkan bahawa organisma akuatik bersaiz lebih besar cenderung untuk mengumpul lebih banyak mikroplastik (Abbasi et al. 2018; Huang et al. 2020). Fenomena ini dapat dijelaskan melalui biotumpukan dengan mikroplastik terkumpul dalam badan organisma dari masa ke masa akibat tempoh pendedahan yang lebih lama (Feng et al. 2019; Huang et al. 2020). Selain itu, biomagnifikasi turut berperanan, apabila kepekatan mikroplastik meningkat di sepanjang rantaian makanan, khususnya apabila organisma yang lebih besar memakan organisma lebih kecil yang telah tercemar (Matupang et al. 2023). Penemuan ini menyokong hipotesis bahawa saiz badan dan tempoh pendedahan memainkan peranan penting dalam tumpukan mikroplastik dalam ikan tongkol.

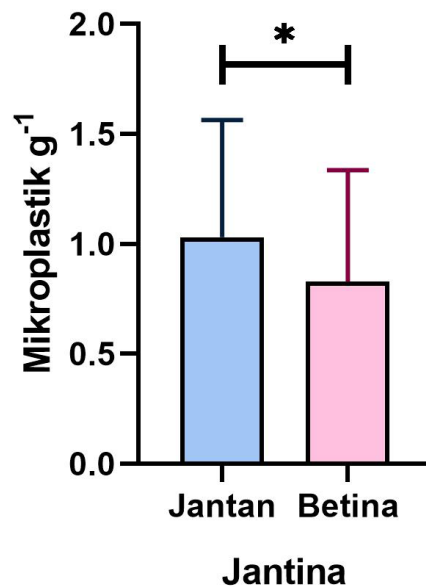
PARAMETER FIZIKO-KIMIA MIKROPLASTIK PADA IKAN TONGKOL

Terdapat dua jenis morfologi berbeza ditemui dalam organ ikan tongkol (Rajah 5(a)). Serat merupakan jenis morfologi mikroplastik yang paling banyak ditemui (89.95%), diikuti dengan serpihan (10.05%). Karbalaei et al. (2019) turut mendapati serat dan serpihan adalah jenis morfologi mikroplastik yang dominan ditemui dalam perairan Malaysia. Kajian daripada Ghani et al. (2020) yang dijalankan di perairan Terengganu juga mendapati bahawa serat dan serpihan merupakan jenis morfologi dominan yang ditelan oleh organisma marin. Kelimpahan mikroplastik jenis serat dalam ikan dipengaruhi oleh beberapa faktor abiotik dan persekitaran seperti habitat,

lokasi, tingkah laku pemakanan, jangka masa pendedahan luaran dan tahap trofik (Compa et al. 2018; Capone, Petrillo & Mistic 2020; Nematollahi et al. 2021). Antara sumber yang berpotensi menjadi faktor pada pencemaran mikroplastik serat adalah peralatan menangkap ikan seperti pukat tunda dan lepasan air basuhan pakaian serta tekstil sintetik, manakala produk plastik untuk kegunaan harian seperti barangan plastik lain yang lebih besar adalah sumber utama pada pencemaran mikroplastik jenis serpihan selepas melalui proses luluhawa dan pemecahan (Browne 2015; Hidalgo-Ruz et al. 2012; Jambeck et al. 2015). Seterusnya, mikroplastik serat dan serpihan juga berpotensi diangkut dari persekitaran daratan melalui angin atau air laut (Evangelidou et al. 2020).

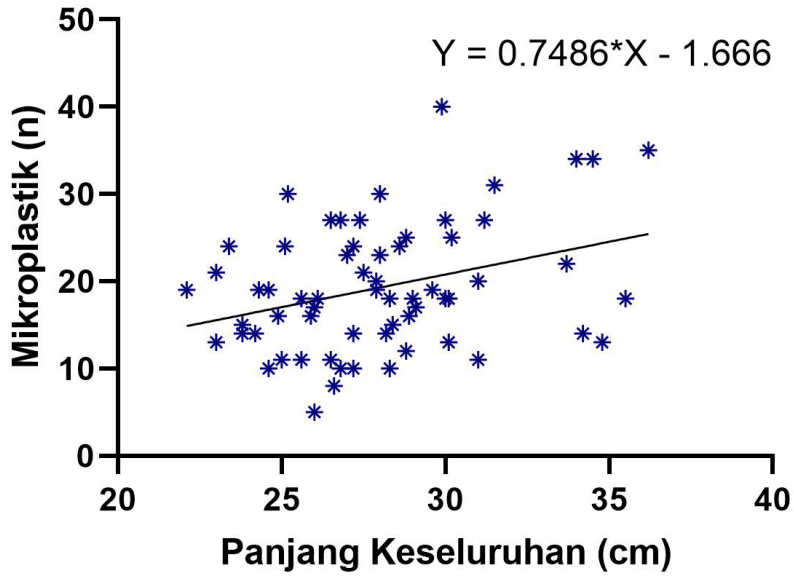
Berdasarkan Rajah 5(b), warna mikroplastik yang paling menonjol ialah hitam (61.58%) dan biru (21.39%). Beberapa kajian lepas turut melaporkan mikroplastik berwarna hitam dan biru lebih kerap dijumpai di persekitaran marin (Morgana et al. 2018; Su et al. 2019; Wiczorek et al. 2018). Kajian dari Kepulauan Guarapari oleh Macieira et al. (2021) mendapati bahawa warna zarah kedua yang paling biasa dijumpai ialah biru. Hal ini dikaitkan dengan faktor kesilapan pengecaman organisma marin bercahaya ('bioluminescence'), seperti kopipod, amfipod dan misid yang memancarkan cahaya dalam gelombang biru yang panjang (Cronin et al. 2014). Warna yang lebih gelap seperti hitam dan biru lebih mudah dikesan oleh organisma marin dan berkemungkinan besar mikroplastik berwarna gelap ini telah disalah anggap sebagai makanan (Chen et al. 2021; Matupang et al. 2023).

Mikroplastik dengan julat saiz 0.01-1.00 mm adalah yang paling tinggi dijumpai dalam kajian ini berbanding

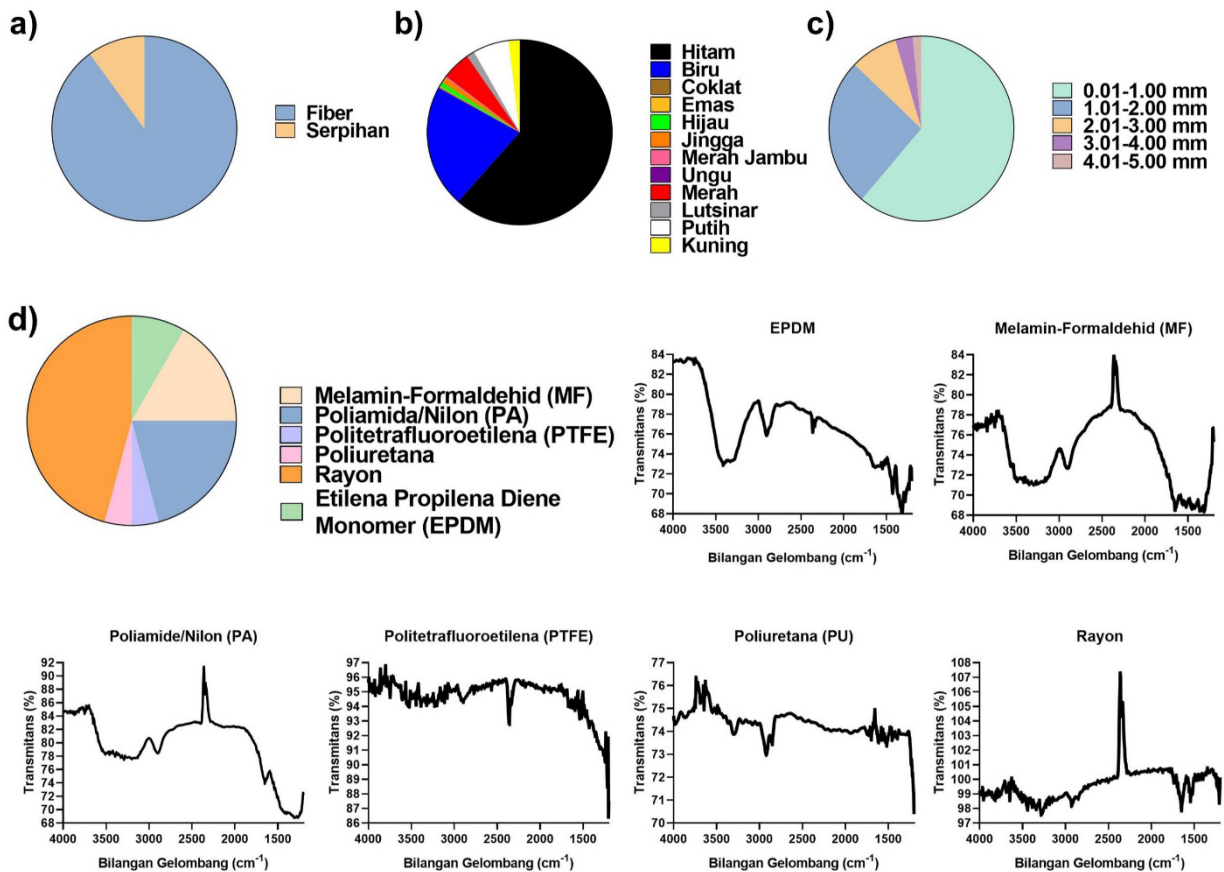


Simbol asterisk (*) menunjukkan terdapat perbezaan signifikan antara jantina ($P < 0.05$)

RAJAH 3. Kelimpahan mikroplastik mengikut jantina ikan tongkol



RAJAH 4. Perkaitan antara kelimpahan mikroplastik dan saiz badan ikan tongkol



RAJAH 5. Parameter fiziko-kimia mikroplastik pada ikan tongkol berdasarkan a) bentuk mikroplastik, b) warna mikroplastik, c) saiz mikroplastik dan d) jenis polimer mikroplastik bersama spektrum mikro-FTIR

julat saiz mikroplastik lain (Rajah 5(c)). Kajian terdahulu turut melaporkan keputusan kajian yang serupa dengan mikroplastik bersaiz 1.00 mm ke bawah merupakan saiz yang paling kerap dikesan dalam ekosistem marin (Feng et al. 2019; Lusher, Mchugh & Thompson 2013; Rochman et al. 2013). Walau bagaimanapun, mikroplastik yang dijumpai pada kulit ikan tongkol mempunyai saiz yang lebih besar. Disebabkan kulit ikan lazimnya lebih mudah tercemar kerana terdedah terhadap alam sekitar dan faktor luaran secara langsung, maka berkemungkinan besar mikroplastik bersaiz lebih besar yang terdapat di habitat asal ikan ini telah melekat secara langsung pada kulit ikan tersebut (Abbasi et al. 2018; Habib et al. 2022; Lusher & Covernton 2022).

Sebanyak enam jenis polimer mikroplastik telah dikenal pasti menggunakan spektroskopi mikro-FTIR dengan polimer yang paling banyak ditemui ialah rayon (45.83%) (Rajah 5(d)). Rayon adalah sejenis serat selulosa yang dihasilkan melalui proses regenerasi dan sering digunakan dalam produk tekstil serta pelbagai aplikasi industri (Comnea-Stancu et al. 2017). Mikroplastik serat berpolimer rayon telah dikenal pasti sebagai jenis mikroplastik yang dominan dijumpai dalam saluran gastrousus ikan (Lusher, Mchugh & Thompson 2013). Selain itu, serat jenis ini juga dianggap sebagai salah satu sumber utama polimer mikroplastik yang memasuki laut dalam, termasuk sedimen laut (Comnea-Stancu et al. 2017; Woodall et al. 2014). Pencemaran mikroplastik berpolimer rayon yang tinggi dalam ikan tongkol mungkin berpunca daripada pendedahan berterusan terhadap serat selulosa di persekitaran marin, terutamanya pada air kolum, yang akhirnya termendap ke dalam sedimen laut. Penemuan ini menunjukkan bahawa bahan pencemar antropogen, seperti serat rayon, menyumbang secara signifikan terhadap pencemaran mikroplastik di perairan marin dan memberi implikasi kepada organisma pelagik seperti ikan tongkol.

KESIMPULAN

Ikan tongkol (*Euthynnus affinis*) adalah spesies komersial yang popular dalam masakan di Malaysia, terutamanya dalam hidangan seperti Nasi Dagang yang sering dijadikan pilihan sarapan pagi. Kajian ini telah mengenal pasti kehadiran mikroplastik dalam ikan tongkol dengan rayon sebagai polimer yang paling dominan. Mikroplastik berpolimer rayon yang merupakan serat selulosa, diketahui memainkan peranan utama dalam pencemaran mikroplastik di persekitaran akuatik. Kajian ini juga mendapati bahawa ikan jantan mengandungi mikroplastik yang lebih tinggi berbanding ikan betina dan ikan yang lebih besar cenderung mengumpul lebih banyak mikroplastik, mungkin disebabkan oleh pendedahan yang lebih lama dalam persekitaran yang tercemar. Mikroplastik lebih banyak ditemui pada organ saluran gastrousus dan kulit, berbanding pada insang ikan tongkol. Walaupun insang dan saluran gastrousus pada kebiasaannya akan

dibuang sebelum dimasak, namun mikroplastik masih terdapat banyak pada kulit luar ikan tongkol yang dikaji. Mikroplastik pada kulit ikan tongkol berpotensi untuk dimakan oleh manusia yang berkemungkinan besar boleh memberi risiko terhadap kesihatan manusia. Oleh itu, adalah amat disyorkan agar ikan tongkol dibersihkan dengan teliti terlebih dahulu sebelum dimasak. Walaupun membilas kulit ikan sahaja tidak dapat menghapuskan mikroplastik sepenuhnya, akan tetapi langkah ini tetap dapat mengurangkan sejumlah besar mikroplastik yang terdapat pada kulit ikan secara signifikan. Penemuan ini memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai tahap pencemaran mikroplastik di Malaysia, terutamanya dalam ikan tongkol yang menjadi kegemaran masyarakat tempatan dan menekankan keperluan bagi menangani isu pencemaran sampah plastik di ekosistem marin demi melindungi kesihatan manusia dan kelestarian persekitaran laut.

PENGHARGAAN

Kami ingin merakamkan setinggi-tinggi penghargaan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) dan Kementerian Pengajian Tinggi, Malaysia (KPT) atas geran projek penyelidikan yang diberikan melalui Skim Geran Penyelidikan Fundamental (FRGS/1/2020/STG03/UKM/03/1). Kami juga ingin menyampaikan setinggi-tinggi penghargaan kepada ahli-ahli yang berdedikasi dalam kumpulan penyelidikan Microplastics In Biota, Universiti Kebangsaan Malaysia (MIB-UKM), terutamanya Noraziani Shaari, Daniel Maloni Matupang, Noor Alia Ahmad Nordin, Haziq Imran Zulkifli, Noraini Nabila Nasharuddin dan Nahrusyifa' A. Karim atas sumbangan dan bantuan berharga mereka semasa kajian ini dijalankan.

RUJUKAN

- Abbasi, S., Soltani, N., Keshavarzi, B., Moore, F., Turner, A. & Hassanaghaci, M. 2018. Microplastics in different tissues of fish and prawn from the Musa Estuary, Persian Gulf. *Chemosphere* 205: 80-87.
- Aziz, N.A., Ghazali, A., Yunus, K.B., Annual, Z.F., Ahmad, A. & Chuan, O.M. 2020. Longtail tuna (*Thunnus tonggol*) consumption frequency in Terengganu, Malaysia. *Open Journal of Marine Science* 10: 141-148.
- Badgie, D., Samah, M.A.A., Manaf, L.A. & Muda, A.B. 2012. Assessment of municipal solid waste composition in Malaysia: Management, practice, and challenges. *Polish Journal of Environmental Studies* 21(3): 539-547.
- Bergmann, M., Gutow, L. & Klages, M. 2015. *Marine Anthropogenic Litter*. Springer Nature.
- Betts, K. 2008. Why small plastic particles may pose a big problem in the oceans. *Environmental Sciences & Technology* 42(24): 8995.

- Browne, M.A. 2015. Sources and pathways of microplastics to habitats. In *Marine Anthropogenic Litter*, disunting oleh Bergmann, M., Gutow, L. & Klages, M. Springer, Cham. hlm. 229-244.
- Capone, A., Petrillo, M. & Misic, C. 2020. Ingestion and elimination of anthropogenic fibres and microplastic fragments by the European anchovy (*Engraulis encrasicolus*) of the NW Mediterranean Sea. *Marine Biology* 167: 166.
- Compa, M., Ventero, A., Iglesias, M. & Deudero, S. 2018. Ingestion of microplastics and natural fibres in *Sardina pilchardus* (Walbaum, 1792) and *Engraulis encrasicolus* (Linnaeus, 1758) along the Spanish Mediterranean coast. *Marine Pollution Bulletin* 128: 89-96.
- Chen, J-C., Fang, C., Zheng, R-H., Hong, F-K., Jiang, Y-L., Zhang, M., Li, Y., Hamid, F.S., Bo, J. & Lin, L-S. 2021. Microplastic pollution in wild commercial nekton from the South China Sea and Indian Ocean, and its implication to human health. *Marine Environmental Research* 167: 105295.
- Chen, Y., Wen, D., Pei, J., Fei, Y., Ouyang, D., Zhang, H. & Luo, Y. 2020. Identification and quantification of microplastics using Fourier-transform infrared spectroscopy: Current status and future prospects. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 18: 14-19.
- Collette, B. 2001. Scombridae. Tunas (also, albacore, bonitos, mackerels, seerfishes, and wahoo). *FAO Species Identification Guide for Fishery Purposes. The Living Marine Resources of the Western Central Pacific* 6: 3721-3756.
- Comnea-Stancu, I.R., Wieland, K., Ramer, G., Schwaighofer, A. & Lendl, B. 2017. On the identification of rayon/viscose as a major fraction of microplastics in the marine environment: Discrimination between natural and manmade cellulosic fibers using Fourier transform infrared spectroscopy. *Applied Spectroscopy* 71(5): 939-950.
- Cronin, T.W., Johnsen, S., Marshall, N.J. & Warrant, E.J. 2014. *Visual Ecology*. Princeton: Princeton University Press.
- Daniel, D.B., Ashraf, P.M. & Thomas, S.N. 2020. Microplastics in the edible and inedible tissues of pelagic fishes sold for human consumption in Kerala, India. *Environmental Pollution* 266: 115365.
- Deng, J., Guo, P., Zhang, X., Su, H., Zhang, Y., Wu, Y. & Li, Y. 2020. Microplastics and accumulated heavy metals in restored mangrove wetland surface sediments at Jinjiang Estuary (Fujian, China). *Marine Pollution Bulletin* 159: 111482.
- Egbeocha, C.O., Malek, S., Emenike, C.U. & Milow, P. 2018. Feasting on microplastics: Ingestion by and effects on marine organisms. *Aquatic Biology* 27: 93-106.
- Evangelidou, N., Grythe, H., Klimont, Z., Heyes, C., Eckhardt, S., Lopez-Aparicio, S. & Stohl, A. 2020. Atmospheric transport is a major pathway of microplastics to remote regions. *Nature Communications* 11(1): 3381.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2018. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2018 - Meeting the Sustainable Development Goals*. CC BY-NC-SA 3.0 IGO. Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO.
- Feng, Z., Zhang, T., Li, Y., He, X., Wang, R., Xu, J. & Gao, G. 2019. The accumulation of microplastics in fish from an important fish farm and mariculture area, Haizhou Bay, China. *Science of The Total Environment* 696: 133948.
- Ghani, L.A., Saputra, J., Muhammad, J., Zulkarnaen, I. & Alfiady, T. 2020. An investigation of waste management (phosphorus) and its relationship to the local economic circulars in Terengganu, Malaysia. *International Journal of Advanced Science and Technology* 29(7): 1675-1685.
- Habib, R.Z., Kindi, R.A., Salem, F.A., Kittaneh, W.F., Poulouse, V., Iftikhar, S.H., Mourad, A.H.I. & Thiemann, T. 2022. Microplastic contamination of chicken meat and fish through plastic cutting boards. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19(20): 13442.
- Hale, R.C., Seeley, M.E., La Guardia, M.J., Mai, L. & Zeng, E.Y. 2020. A global perspective on microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 125(1): e2018JC014719.
- Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R.C. & Thiel, M. 2012. Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification. *Environmental Science & Technology* 46(6): 3060-3075.
- Huang, J.S., Koongolla, J.B., Li, H.X., Lin, L., Pan, Y.F., Liu, S., He, W.H., Maharana, D. & Xu, X.R. 2020. Microplastic accumulation in fish from Zhanjiang mangrove wetland, South China. *Science of The Total Environment* 708: 134839.
- Ibrahim, N.R. & Mat Noordin, N.N. 2020. Understanding the issue of plastic waste pollution in Malaysia: A case for human security. *Journal of Media and Information Warfare (JMIW)* 13(1): 105-140.
- Jaafar, N., Azfaralariff, A., Musa, S.M., Mohamed, M., Yusoff, A.H. & Lazim, A.M. 2021. Occurrence, distribution and characteristics of microplastics in gastrointestinal tract and gills of commercial marine fish from Malaysia. *Science of the Total Environment* 799: 149457.
- Jaafar, N., Musa, S.M., Azfaralariff, A., Mohamed, M., Yusoff, A.H. & Lazim, A.M. 2020. Improving the efficiency of post-digestion method in extracting microplastics from gastrointestinal tract and gills of fish. *Chemosphere* 260: 127649.

- Jambeck, J.R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T.R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R. & Law, K.L. 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science of The Total Environment* 347(6223): 768-771.
- Kapp, K.J. & Yeatman, E. 2018. Microplastic hotspots in the Snake and Lower Columbia Rivers: A journey from the Greater Yellowstone Ecosystem to the Pacific Ocean. *Environmental Pollution* 241: 1082-1090.
- Karami, A., Golieskardi, A., Ho, Y. B., Larat, V. & Salamatinia, B. 2017. Microplastics in eviscerated flesh and excised organs of dried fish. *Sci Reports* 7(1): 5473.
- Karbalaci, S., Golieskardi, A., Hamzah, H.B., Abdulwahid, S., Hanachi, P., Walker, T.R. & Karami, A. 2019. Abundance and characteristics of microplastics in commercial marine fish from Malaysia. *Marine Pollution Bulletin* 148: 5-15.
- Leads, R.R., Burnett, K.G. & Weinstein, J.E. 2019. The effect of microplastic ingestion on survival of the grass shrimp *Palaemonetes pugio* (Holthuis, 1949) challenged with *Vibrio campbellii*. *Environmental Toxicology and Chemistry* 38(10): 2233-2242.
- Liang, Y., Tan, Q., Song, Q. & Li, J. 2021. An analysis of the plastic waste trade and management in Asia. *Waste Management* 119: 242-253.
- Lusher, A.L. & Covernton, G.A. 2022. Microplastics in fish and seafood species. *Plastics and the Ocean: Origin, Characterization, Fate, and Impacts*, disunting oleh Andrady, A.L. hlm. Wiley. 367-388.
- Lusher, A.L., Mchugh, M. & Thompson, R.C. 2013. Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tract of pelagic and demersal fish from the English Channel. *Marine Pollution Bulletin* 67(1-2): 94-99.
- Lusher, A.L., O'Donnell, C., Officer, R. & O'Connor, I. 2016. Microplastic interactions with North Atlantic mesopelagic fish. *ICES Journal of Marine Science* 73(4): 1214-1225.
- Macieira, R.M., Oliveira, L.A.S., Cardozo-Ferreira, G.C., Pimentel, C.R., Andrades, R., Gasparini, J.L., Sarti, F., Chelazzi, D., Cincinelli, A. & Gomes, L.C. 2021. Microplastic and artificial cellulose microfibers ingestion by reef fishes in the Guarapari Islands, southwestern Atlantic. *Marine Pollution Bulletin* 167: 112371.
- Matupang, D.M., Zulkifli, H.I., Arnold, J., Lazim, A.M., Ghaffar, M.A. & Musa, S.M. 2023. Tropical sharks feasting on and swimming through microplastics: First evidence from Malaysia. *Marine Pollution Bulletin* 189: 114762.
- Morgana, S., Ghigliotti, L., Estévez-Calvar, N., Stifanese, R., Wieckzorek, A., Doyle, T., Christiansen, J.S., Faimali, M. & Garaventa, F. 2018. Microplastics in the Arctic: A case study with sub-surface water and fish samples off Northeast Greenland. *Environmental Pollution* 242: 1078-1086.
- Nematollahi, M.J., Keshavarzi, B., Moore, F., Esmacili, H.R., Saravi, H.N. & Sorooshian, A. 2021. Microplastic fibers in the gut of highly consumed fish species from the southern Caspian Sea. *Marine Pollution Bulletin* 168: 112461.
- Nootmorn, P., Sumontha, M., Keereerut, P., Jayasinge, R., Jagannath, N. & Sinha, M.K. 2008. Stomach content of the large pelagic fishes in the bay of Bengal. *The Ecosystem-Based Fishery Management in the Bay of Bengal IOTC-2008-WPEB-11*.
- Parr, C.S., Wilson, N., Leary, P., Schulz, K.S., Lans, K., Walley, L., Hammock, J.A., Goddard, A., Rice, J., Studer, M., Holmes, J.T.G. & Corrigan Jr., R.J. 2014. The encyclopedia of life v2: Providing global access to knowledge about life on earth. *Biodiversity Data Journal* <https://doi.org/10.3897/BDJ.2.e1079>
- Rahmawati, N.H. & Patria, M.P. 2019. Microplastics dissemination from fish *Mugil dussumieri* and mangrove water of Muara Teluknaga, Tangerang, Banten. *Journal of Physics: Conference Series* 1282: 012104.
- Rochman, C.M., Hoh, E., Kurobe, T. & Teh, S.J. 2013. Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. *Scientific Reports* 3: 3263.
- Roy, P.K., Hakkarainen, M., Varma, I.K. & Albertsson, A.C. 2011. Degradable polyethylene: Fantasy or reality. *Environmental Science & Technology* 45(10): 4217-4227.
- Ryan, P.G. 2015. A brief history of marine litter research. *Dlm Marine Anthropogenic Litter*, disunting oleh Bergmann, M., Gutow, L. & Klages, M. Springer, Cham. hlm.1-25.
- Sarijan, S., Azman, S., Mohd Said, M.I. & Lee, M.H. 2019. Ingestion of microplastics by commercial fish in Skudai River, Malaysia. *Environment Asia* 12(3): 75-84.
- Sbrana, A., Valente, T., Scacco, U., Bianchi, J., Silvestri, C., Palazzo, L., De Lucia, G.A., Valerani, C., Ardizzone, G. & Matiddi, M. 2020. Spatial variability and influence of biological parameters on microplastic ingestion by *Boops boops* (L.) along the Italian coasts (Western Mediterranean Sea). *Environmental Pollution* 263: 114429.
- Smith, M., Love, D.C., Rochman, C.M. & Neff, R.A. 2018. Microplastics in seafood and the implications for human health. *Current Environmental Health Reports* 5(3): 375-386.
- Su, L., Deng, H., Li, B., Chen, Q., Pettigrove, V., Wu, C. & Shi, H. 2019. The occurrence of microplastic in specific organs in commercially caught fishes from coast and estuary area of east China. *Journal of Hazardous Materials* 365: 716-724.
- Sundaray, J.K., Rather, M.A., Kumar, S. & Agarwal, D. 2021. *Recent Updates in Molecular Endocrinology and Reproductive Physiology of Fish: An Imperative Step in Aquaculture*. Singapore: Springer.

- Suratman, S. & Latif, M. 2015. Reassessment of nutrient status in Setiu Wetland, Terengganu, Malaysia. *Asian Journal of Chemistry* 27(1): 239-242.
- Topçu, E.N., Tonay, A.M., Dede, A., Öztürk, A.A. & Öztürk, B. 2013. Origin and abundance of marine litter along sandy beaches of the Turkish Western Black Sea Coast. *Marine Environmental Research* 85: 21-28.
- Van Colen, C., Vanhove, B., Diem, A. & Moens, T. 2020. Does microplastic ingestion by zooplankton affect predator-prey interactions? An experimental study on larviphagy. *Environmental Pollution* 256: 113479.
- Vital, S.A., Cardoso, C., Avio, C., Pittura, L., Regoli, F. & Bebianno, M.J. 2021. Do microplastic contaminated seafood consumption pose a potential risk to human health? *Marine Pollution Bulletin* 171: 112769.
- Wagner, J., Wang, Z.M., Ghosal, S., Rochman, C., Gassel, M. & Wall, S. 2017. Novel method for the extraction and identification of microplastics in ocean trawl and fish gut matrices. *Analytical Methods* 9(9): 1479-1490.
- Wieczorek, A.M., Morrison, L., Croot, P.L., Allcock, A.L., Macloughlin, E., Savard, O., Brownlow, H. & Doyle, T.K. 2018. Frequency of microplastics in mesopelagic fishes from the Northwest Atlantic. *Frontiers in Marine Science* <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00039>
- Woodall, L.C., Sanchez-Vidal, A., Canals, M., Paterson, G.L., Coppock, R., Sleight, V., Calafat, A., Rogers, A.D., Narayanaswamy, B.E. & Thompson, R.C. 2014. The deep sea is a major sink for microplastic debris. *Royal Society Open Science* 1(4): 140317.
- Wright, S.L. & Kelly, F.J. 2017. Plastic and human health: A micro issue? *Environmental Science & Technology* 51(12): 6634-6647.
- Zhao, S., Wang, T., Zhu, L., Xu, P., Wang, X., Gao, L. & Li, D. 2019. Analysis of suspended microplastics in the Changjiang Estuary: Implications for riverine plastic load to the ocean. *Water Research* 161: 560-569.

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: syafiqmusa@ukm.edu.my