

Taburan Menegak Mikroplastik Dalam Sedimen Teras Di Muara Sungai Pulai, Johor (Vertical Distribution of Microplastics in Sediment Cores at Sungai Pulai Estuary, Johor)

LAILA ZULAIFAH ZULKIPLI, NURUL AISYAH MOHD ZAKI, MOHAMAD HAFIZ ABDUL HALIM, KHAIRIATUL
MARDIANA JANSAR, MOHD TALIB LATIF & MASNI MOHD ALI*

*Jabatan Sains Bumi dan Alam Sekitar, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM
Bangi, Selangor, Malaysia*

Diserahkan: 6 Mei 2024/Diterima: 30 Julai 2024

ABSTRAK

Kewujudan mikroplastik dapat dilihat di pesisir pantai dan persekitaran marin dengan sedimen adalah tempat pemendapan bagi mikroplastik. Walaupun begitu, taburan mikroplastik secara menegak dalam sedimen adalah berbeza-beza dan tidak jelas sepenuhnya. Kajian ini tertumpu kepada kehadiran dan pencirikan mikroplastik di dalam sedimen teras di muara Sungai Pulai dengan dua stesen (SP1 dan SP2) telah dipilih. Sampel sedimen teras telah diambil menggunakan pensampel teras. Sampel sedimen diekstrak dan mikroplastik dicirikan dengan menggunakan mikroskop stereo dan analisis polimer dibuat menggunakan spektroskopi μ -RAMAN. Hasil daripada kajian ini menunjukkan kelimpahan mikroplastik yang paling tinggi didapati pada lapisan sedimen teratas (0–5 cm) iaitu 506 ± 115.47 partikel/kg di stesen SP1 dan sebanyak 220.00 ± 28.28 partikel/kg pada lapisan pertengahan (10–15 cm) di stesen SP2. Majoriti mikroplastik daripada kajian ini dijumpai dalam julat saiz $< 100 \mu\text{m}$ (47%) di stesen SP1 dan saiz 100–500 μm (39%) di stesen SP2. Selain itu, kebanyakan mikroplastik dijumpai adalah berwarna biru, iaitu 79% (SP1) dan 87% (SP2). Hanya dua bentuk mikroplastik yang dijumpai dalam kedua-dua teras sedimen iaitu bentuk gentian dan serpihan. Sebanyak 51% mikroplastik berbentuk serpihan mendominasi stesen SP1 dan 58% mikroplastik berbentuk gentian mendominasi stesen SP2. Poliester (PES), polietilena tereftalat (PET) dan poliakrilamida (PAM) telah dikenal pasti dan didapati polimer PET adalah polimer yang paling banyak ditemui di kawasan kajian mewakili 56% daripada keseluruhan polimer. Kajian ini dapat membantu untuk memahami corak, jenis dan potensi asal-usul mikroplastik dalam sedimen muara.

Kata kunci: Mikroplastik; muara; polimer; sedimen teras; spektroskopi RAMAN

ABSTRACT

Existence of microplastic can be seen in coastal and marine environments, and sediment serve as a sink for microplastic. However, the vertical distribution of microplastic in sediments varies and is not entirely clear. This study focuses on the presence and characterization of microplastics in sediment cores in Sungai Pulai estuary, with two stations (SP1 and SP2). Sediment core samples were collected using a core sampler. Sediment samples were extracted and microplastics were characterized using a stereo microscope and polymer analysis were conducted using μ -RAMAN spectroscopy. The results of this study show that the highest abundance of microplastic is in the top sediment layer (0–5 cm), with 506 ± 115.47 particles/kg at station SP1, and at station SP2, 220.00 ± 28.28 particles/kg were found in the middle layer (10–15 cm). This study found that the majority of microplastics were in the size range of $< 100 \mu\text{m}$ (47%) at station SP1 and in between size range of 100–500 μm (39%) at station SP2. The predominant microplastics colour found in both stations SP1 and SP2 are blue (79% and 87%, respectively). Only two shapes of microplastics were found in both sediment cores namely fibers and fragments. A total of 51% of fragment microplastics dominates SP1 station and 58% of fiber microplastics dominates SP2 station. Polyester (PES), polyethylene terephthalate (PET) and polyacrylamide (PAM) were identified, and PET is the most detected polymer in the study area, representing 56% of all polymers studied. This study contributed to understanding the patterns, types, and potential sources of microplastics in estuarine sediments.

Keywords: Estuary; microplastic; polymer; RAMAN spectroscopy; sediment core

PENDAHULUAN

Pencemaran plastik pada alam sekitar berada dalam keadaan membimbangkan secara global. Anggaran

sebanyak 80-85% pencemaran dalam persekitaran marin adalah plastik dengan 90% partikel terapung dalam persekitaran marin (Ganesh Kumar et al. 2020; Taha et al.

2021). Dianggarkan sebanyak 11 juta tan sampah plastik akan berakhir ke laut setiap tahun (Lau & Murphy 2021; Peng et al. 2021). Kebanyakan plastik yang dilepaskan ke dalam persekitaran akan pecah kepada serpihan plastik saiz lebih kecil yang dipanggil sebagai mikroplastik. Mikroplastik dikelaskan kepada dua jenis, iaitu mikroplastik primer dan sekunder. Mikroplastik primer adalah plastik yang dihasilkan pada saiz mikro bagi penggunaan khusus dalam industri (pelelas dalam produk pencuci dan media bagas udara) atau domestik (produk penjagaan diri, kosmetik) (Auta, Emenike & Fauziah 2017; Kurniawan et al. 2021; Rakib et al. 2022; Simon-Sánchez et al. 2019). Polimer yang biasa dijumpai dalam mikroplastik primer adalah polietilena (PE), namun polimer lain seperti polietilena tereftalat (PET), polipropilena (PP), polimetil metakrilat (PMMA), nilon (PA), poliester dan poliuretana juga digunakan (Cole et al. 2011). Mikroplastik sekunder pula datang daripada hasil pecahan atau degradasi plastik besar kepada saiz yang lebih kecil (Auta, Emenike & Fauziah 2017). Proses degradasi plastik boleh terjadi daripada proses fizikal, kimia dan biologi pada persekitaran (Andrady 2017; Simon-Sánchez et al. 2019). Sumber mikroplastik dalam persekitaran marin datang daripada aktiviti daratan yang dilakukan oleh manusia seperti aktiviti industri (pengilangan, akuakultur, perikanan dan perkapalan), pembuangan sisa tidak terurus, pelancongan dan aktiviti domestik. Kilang pembuatan plastik menghasilkan mikroplastik yang tinggi dalam persekitaran (Ziajahromi, Neale & Leusch 2016). Mikroplastik juga boleh terhasil daripada penggunaan dan kerosakan mesin dan peralatan membuat plastik (Hidalgo-Ruz et al. 2012). Isu utama bagi masalah pencemaran plastik adalah kebarangkalian plastik ini dimakan oleh hidupan marin. Mikroplastik berpotensi membawa pencemaran organik berterusan (POP) boleh menjejaskan rantai makanan dan sekali gus menjejaskan kesihatan manusia. Mikroplastik dikaitkan dengan masalah organ dalaman seperti keradangan, kecederaan tisu dan penurunan penyerapan nutrien dalam haiwan (Bergmann et al. 2019; Deng et al. 2017). Pengambilan mikroplastik oleh organisma marin dan seterusnya masuk ke dalam rangkaian makanan kepada manusia mampu meningkatkan kebarangkalian untuk kita memakannya (Hartmann et al. 2019; Li et al. 2015).

Menurut Meijer et al. (2021), Malaysia merupakan negara teratas melepaskan sisa buangan plastik tidak terurus ke dalam laut, iaitu sebanyak 73,098 tan setiap tahun. Pencemaran mikroplastik biasanya dijumpai pada kawasan estuari dan pesisir pantai (Zaki et al. 2021). Sedimen dalam estuari berperanan dalam kitaran nutrien, proses sedimentasi dan menawarkan habitat kepada pelbagai organisma. Ia juga bertindak sebagai zon peralihan kritikal di mana ekosistem air tawar dan laut terkumpul, menjadikannya kawasan yang mudah terdedah kepada pengumpulan mikroplastik (Malli et al. 2022). Terdapat kajian melaporkan bahawa kebarangkalian tinggi bagi hutan paya bakau di Malaysia terdedah kepada pencemaran plastik kerana terletak di antara daratan dan

laut dengan sisa buangan dari kawasan perindustrian berdekatan dilepaskan, sama ada secara sengaja atau tidak sengaja (Ibrahim et al. 2022; Mohamed et al. 2023). Taburan mikroplastik dalam sedimen merupakan unsur paling baik digunakan sebagai penunjuk aras pencemar mikroplastik bagi jangka masa panjang dalam persekitaran, terutamanya taburan menegak (Zhou et al. 2021). Melalui kajian Zhou et al. (2021), taburan mikroplastik berkurang secara bererti dengan bertambahnya kedalaman sedimen. Faktor lain seperti jenis polimer, ketumpatan dan saiz, serta kehadiran bakteria memecahkan partikel plastik kepada serpihan lebih kecil mempengaruhi pengedaran mikroplastik dalam sedimen teras (Lenaker et al. 2019; Niu et al. 2022).

Muara Sungai Pulai adalah rumah kepada sistem bakau sungai terbesar di negeri Johor. Lokasi ini merupakan salah satu contoh terbaik lembangan sungai tropika tanah rendah dengan kepelbagaian biologi yang kaya bergantung kepada bakau, hasil daripada kawasan rumput laut yang terdapat di sekitar dataran lumpur pasang surut dan hutan sungai air tawar pedalaman. Selain itu, hutan simpan Sungai Pulai juga telah digazetkan sebagai Hutan Simpan Kekal pada tahun 1923, ia juga telah dikelaskan sebagai hutan pengeluaran dan aktiviti pembalakan telah bermula dari tahun 1928. Di sepanjang Sungai Pulai terdapat sektor industri seperti Loji Janakuasa Tanjung Bin. Loji janakuasa ini merupakan lojikuasa arang batu yang terdapat di negeri Johor. Selain itu, terdapat juga Pelabuhan Tanjung Pelepas yang telah beroperasi dari Januari 2000 dan terletak di bahagian hujung paling selatan Semenanjung Malaysia berhampiran dengan Lintasan Kedua Malaysia-Singapura (Renkema & Kinlan 2000). Sehubungan dengan itu, kajian ini memfokuskan kepada taburan mikroplastik dalam sedimen teras di muara Sungai Pulai, Johor, Malaysia. Komposisi fizikal dan kimia mikroplastik ditakrifkan untuk mengenal pasti saiz, bentuk, warna mikroplastik serta morfologi permukaan dan komposisi polimer.

BAHAN DAN KAEDAH

KAWASAN KAJIAN DAN PERSAMPELAN

Sedimen teras telah diambil pada stesen SP1 dan SP2 dengan tiga replikasi di muara Sungai Pulai (Rajah 1). Persampelan dijalankan pada 22 September 2021 sewaktu air surut sekitar pukul 10:10 am. Butiran stesen persampelan seperti koordinat dan kegiatan aktiviti berdekatan dengan stesen persampelan ditunjukkan dalam Jadual 1 dan parameter *in-situ* ditunjukkan pada Jadual 2. Sampel sedimen teras diambil menggunakan pensampel teras yang berdiameter 20 cm. Ukuran panjang sedimen teras didapati bagi stesen SP1 adalah 20 cm dan stesen SP2 adalah 30 cm. Teras sedimen dihiris pada setiap 5 cm. Sampel sedimen kemudiannya dibalut dengan kerajang aluminium dan disimpan dalam bekas penyejuk pada suhu 4 °C.

PENGEKSTRAKAN MIKROPLASTIK

Sampel sedimen dimasukkan ke dalam bekas aluminium dan dikeringkan dalam ketuhar pada suhu 60 °C sehingga mencapai berat malar. Sampel kemudian ditumbuk dan diayak menggunakan pengayak bersaiz 4 mm. Sebanyak 25 g sampel sedimen kering bersaiz kurang daripada 4 mm dimasukkan ke dalam tiub unit pengasingan mikroplastik sedimen. Larutan zink klorida pekat dengan ketumpatan 1.5 g cm⁻³ dicampurkan bersama sampel sedimen di dalam tiub. Setiap tiub digoncang sehingga sampel sedimen dan larutan zink klorida bercampur dan ditutup menggunakan parafilm. Sampel dalam tiub dibiarkan selama tiga hari atau sehingga larutan menjadi jernih dengan tujuan mengasingkan dan membersihkan mikroplastik daripada sedimen (Zobkov et al. 2020). Kemudian, larutan pekat dalam tiub ditapis menggunakan kertas turas nilon 0.45 µm pada sistem penapisan vakum. Kertas turas nilon diletakkan di dalam kelalang kon dengan 20 mL 30% hidrogen peroksida dan 20 mL larutan pemangkin FeSO₄ 0.05 M. Larutan dipanaskan di atas plat pemanas pasir dengan suhu 50 °C sehingga larutan menjadi warna kuning pudar. Selepas itu, larutan dalam kelalang kon ditapis kali kedua dengan menggunakan kertas turas polikarbonat 10 µm di atas tapak set penapis. Kelalang kon perlu dibersihkan menggunakan air suling yang ditapis supaya tiada mikroplastik melekat pada tiub, bagi memastikan mikroplastik diekstrak sebanyak yang boleh (Willis et al. 2017). Semua kertas turas disimpan dalam piring petri kaca bagi menjalankan pemerhatian mikroplastik di bawah mikroskop stereo.

PENENTUAN CIRI MIKROPLASTIK

Mikroplastik dalam sampel sedimen teras dicerap di bawah mikroskop stereo dan kamera (Parco Scientific Simul-Focal Trinocular Zoom) dengan pembesaran berjulat 1.0x – 4.5x bagi mengira jumlah mikroplastik dijumpai dan menentukan ciri mikroplastik seperti bentuk, warna dan saiz. Bentuk mikroplastik dikelaskan kepada dua kategori iaitu bentuk gentian dan serpihan. Penentuan warna mikroplastik adalah berdasarkan warna dominan yang menyerlah semasa penelitian dan terdapat empat warna telah dijumpai (biru, merah, lut sinar dan hitam). Empat kelas julat saiz mikroplastik (< 100 µm, 100 – 500 µm, 500 – 1000 µm dan > 1000 µm) ditetapkan bagi saiz mikroplastik. Beberapa partikel mikroplastik telah dipilih secara rawak bagi penentuan morfologi menggunakan mikroskop elektron pengimbas (SEM) (ZEISS Supra 55VP). Beberapa partikel mikroplastik bersaiz > 1000 µm dipilih secara rawak bagi penentuan polimer mikroplastik menggunakan spektroskopi µ-RAMAN (Thermo Scientific, DRX2xi, USA).

KAWALAN KUALITI

Bagi memastikan jaminan dan kawalan kualiti mengendalikan penyelidikan mikroplastik, beberapa langkah telah diambil sepanjang menjalankan aktiviti persampelan dan kerja makmal. Semasa menjalankan aktiviti persampelan dan kerja makmal, peralatan yang digunakan dibuat daripada besi tahan karat, kaca dan kayu dan menggunakan peralatan berasaskan plastik semimumum yang mungkin. Pakaian selain daripada bahan mikrofiber, kot makmal daripada kapas dan sarung tangan getah telah digunakan sepanjang mengendalikan penyelidikan. Peralatan makmal telah dibersihkan menggunakan Decon-90 setiap kali digunakan dan ruang kerja makmal dibersihkan menggunakan tisu basah dengan kerap bagi mengurangkan kebarangkalian pencemaran antara sampel. Larutan yang digunakan sepanjang penyelidikan telah ditapis dan sarung tangan getah kerap ditukar bagi mengelakkan pencemaran kepada sampel.

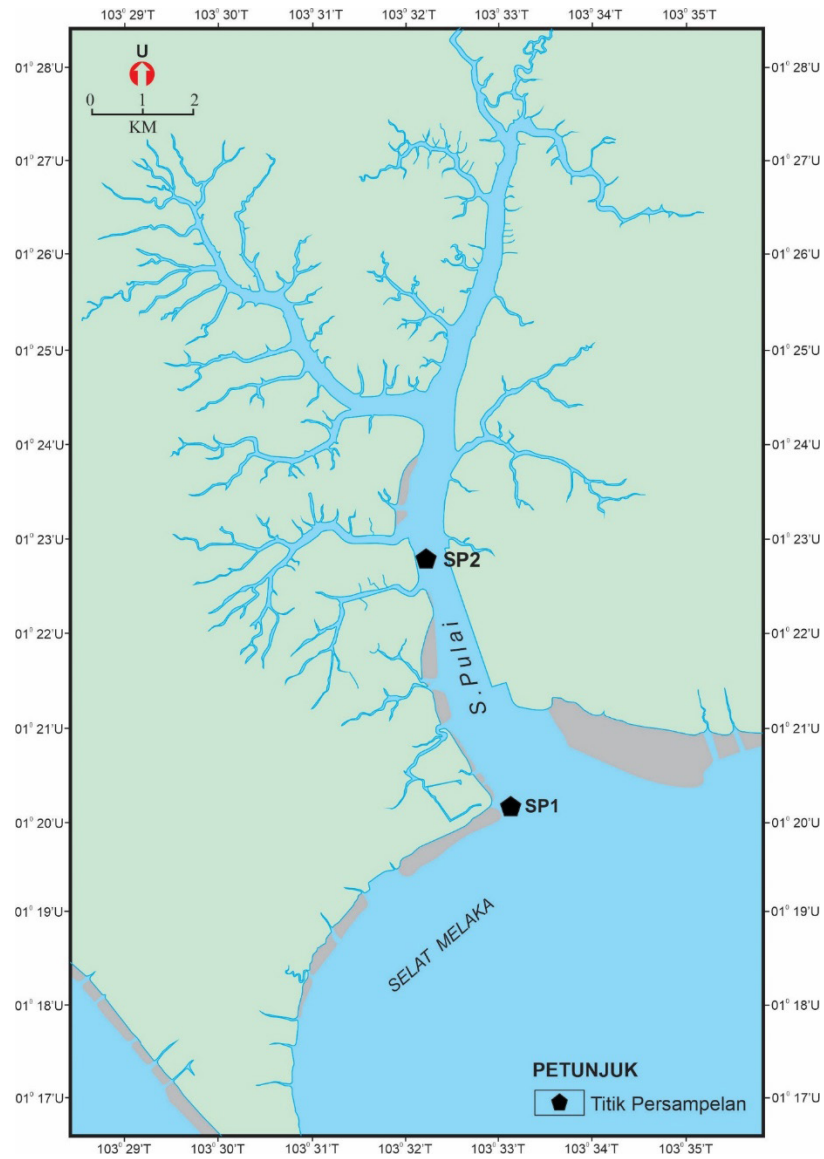
ANALISIS STATISTIK

Data mikroplastik telah dianalisis menggunakan perisian *Microsoft Excel* dan *OriginPro 2024*. Ujian statistik digunakan dalam kajian ini adalah ujian Shapiro-Wilk bagi menentukan taburan data normal dan ujian Kruskal-Wallis bagi menentukan perbezaan antara pemboleh ubah bersandar.

HASIL DAN PERBINCANGAN

TABURAN MIKROPLASTIK

Jumlah keseluruhan partikel mikroplastik dijumpai pada stesen SP1 adalah sebanyak 1200 partikel/kg dan pada stesen SP2 adalah sebanyak 980 partikel/kg. Bagi stesen SP1 dan SP2, julat kelimpahan mikroplastik masing-masing adalah antara 173 partikel/kg hingga 506 partikel/kg dan 93 partikel/kg hingga 220 partikel/kg. Purata kelimpahan tertinggi pada stesen SP1 adalah pada kedalaman 0-5 cm (506.67 ± 115.47 partikel/kg) dan pada stesen SP2 adalah pada kedalaman 10-15 cm (220.00 ± 28.28 partikel/kg). Rajah 2 menunjukkan kelimpahan purata mikroplastik pada kedalaman berbeza dalam sedimen teras di stesen SP1 dan SP2. Kelimpahan mikroplastik dalam sedimen teras dipengaruhi oleh kadar sedimentasi, kegiatan antropogen dan proses semula jadi (Dung et al. 2021). Pelbagai aktiviti antropogen (pelabuhan antarabangsa, stesen jana kuasa, aktiviti perikanan) dijalankan berhampiran stesen SP1. Tenaga arus sungai yang perlahan menyebabkan banyak sedimen dan mikroplastik termendap pada mulut sungai (Gardel et al. 2022; Mohamed et al. 2023). Kelimpahan mikroplastik dalam kedua-dua sedimen teras menunjukkan penurunan



RAJAH 1. Peta stesen persampelan di kawasan kajian

JADUAL 1. Koordinat dan kegiatan aktiviti di stesen pensampelan

Stesen	Koordinat	Kegiatan aktiviti
SP1	1° 20' 9.48" U 103° 33' 8.08" T	Pelabuhan antarabangsa, loji janakuasa elektrik
SP2	1° 22' 53.22" U 103° 32' 10.69" T	Kawasan perikanan, jambatan perhubungan, Jabatan Laut Malaysia

JADUAL 2. Parameter *in-situ* di stesen persampelan

Stesen	Kedalaman (m)	Suhu (°C)	Jumlah pepejal terlarut (mg/L)	Kekonduksian (μ S)	Kemasinan (ppt)	Oksigen terlarut (%)	Kepekatan oksigen terlarut (ppm)	pH
SP1	21.85	31.2	27.23	46.91	26.7	87.2	6.43	7.47
SP2	20.90	29.3	22.56	42.53	24.9	56.9	4.30	7.08

jumlah mikroplastik mengikut kedalaman. Partikel mikroplastik dalam sedimen teras dijumpai lebih banyak pada lapisan atas bagi stesen SP1 dan lapisan tengah bagi stesen SP2 berbanding lapisan lebih bawah. Lapisan atas menerima mikroplastik baharu daripada sedimen permukaan dan pemendapan mikroplastik sedia ada (Willis et al. 2017; Xue et al. 2020). Namun begitu, berdasarkan ujian Kruskal-Wallis, tiada perbezaan bererti ($p < 0.05$) didapati antara kelimpahan mikroplastik dengan kedalaman yang berbeza pada kedua-dua stesen SP1 dan SP2.

CIRI MIKROPLASTIK

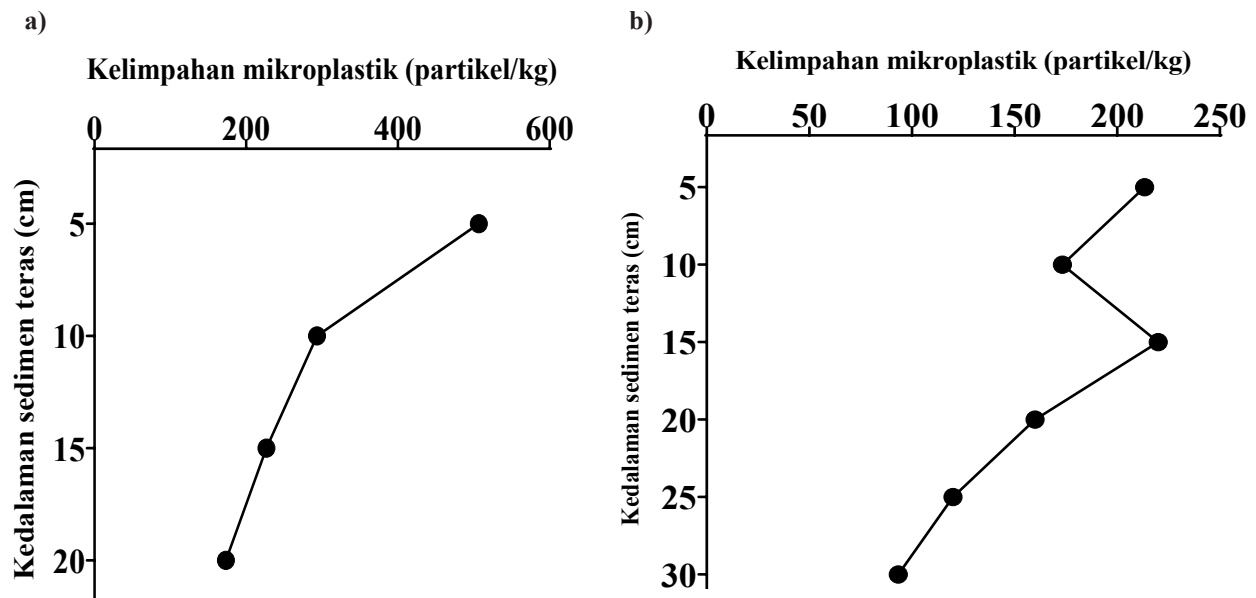
Partikel mikroplastik yang diekstrak daripada sedimen teras stesen SP1 dan SP2 diperhatikan di bawah mikroskop-stereo. Jadual 3 menunjukkan perbandingan dengan kajian lain berkaitan mikroplastik dalam sedimen teras.

Terdapat dua bentuk mikroplastik yang dijumpai dalam kajian ini, iaitu bentuk gentian dan serpihan. Rajah 3 menunjukkan mikroplastik bentuk gentian dan serpihan dijumpai dalam sedimen teras, bersama dengan imej diambil di bawah SEM. Keseluruhan peratus bagi kedua-dua bentuk gentian dan serpihan dalam sedimen teras adalah 53% dan 47%. Peratusan bentuk mikroplastik dalam sedimen teras di stesen SP1 bagi bentuk serpihan ialah 51% dan bentuk gentian ialah 49%. Sedimen permukaan (0-5 cm) merupakan penyumbang tertinggi bagi bentuk serpihan. Bagi stesen SP2, peratusan keseluruhan bentuk gentian adalah sebanyak 58% dan selebihnya adalah bentuk serpihan (42%). Penyumbang tertinggi bagi bentuk gentian adalah pada kedalaman 5-10 cm. Kelimpahan bentuk mikroplastik pada kedalaman berbeza dalam sedimen teras stesen SP1 dan SP2 dapat dirujuk pada Rajah 4. Bentuk mikroplastik dijumpai dalam sedimen teras adalah jenis mikroplastik sekunder yang mana proses plastik terdegradasi dalam persekitaran dan sumber utama bagi kedua-dua bentuk gentian dan serpihan datang daripada kegiatan antropogen di kawasan sekitar. Mikroplastik bentuk gentian berasal daripada aktiviti perikanan (peralatan memancing, jaring pancing), pemendapan atmosfera dan larian permukaan serta pembuangan sisa domestik (Fan et al. 2019; Peng et al. 2017; Zaki et al. 2021). Bentuk gentian mempunyai nisbah luas permukaan

kepada isi padu yang besar, meningkatkan penjerapan partikel tidak organik pada permukaan mikroplastik (Mohamed et al. 2023). Penjerapan bahan tercemar pada permukaan mikroplastik berkait rapat dengan luas permukaan mikroplastik dengan bentuk gentian mampu menjerap bahan tercemar dengan banyak disebabkan nisbah luas permukaan kepada isi padu yang besar (Tan & Mohd Zanuri 2023; Zhou et al. 2021). Bagi mikroplastik bentuk serpihan pula, ia terjadi daripada degradasi plastik bersaiz besar melalui proses mekanikal atau luluhawa (Sarijan et al. 2018; Suteja et al. 2021). Pemerhatian topografi mikroplastik di bawah SEM dalam kajian ini sejajar dengan Suardy, Tahrim dan Ramli (2020) dengan kesan hakisan dan permukaan tidak sekata dapat dilihat pada Rajah 4 (kanan).

Julat saiz mikroplastik telah dikelaskan kepada empat kategori: $< 100 \mu\text{m}$, $100 - 500 \mu\text{m}$, $500-1000 \mu\text{m}$ dan $> 1000 \mu\text{m}$. Rajah 5 menunjukkan kelimpahan julat saiz mikroplastik pada kedalaman berbeza bagi stesen SP1 dan SP2. Peratus setiap julat saiz mikroplastik paling tinggi hingga paling rendah pada stesen SP1 adalah seperti berikut: $< 100 \mu\text{m}$ (47%), $> 1000 \mu\text{m}$ (22%), $100-500 \mu\text{m}$ (19%) dan $500-1000 \mu\text{m}$ (12%). Kedalaman 0-5 cm merupakan penyumbang tertinggi kepada julat saiz $< 100 \mu\text{m}$ dalam sedimen teras stesen SP1. Bagi stesen SP2 pula, peratus keseluruhan julat saiz tertinggi adalah saiz $100-500 \mu\text{m}$ (39%), diikuti dengan saiz $< 100 \mu\text{m}$ (27%), saiz $> 1000 \mu\text{m}$ (22%) dan saiz $500-1000 \mu\text{m}$ (12%). Penyumbang tertinggi saiz $100-500 \mu\text{m}$ adalah pada kedalaman 10-15 cm dalam sedimen teras stesen SP2. Keseluruhan peratus bagi julat saiz mikroplastik adalah saiz $< 100 \mu\text{m}$ (39%), diikuti dengan saiz $100-500 \mu\text{m}$ (26%), saiz $> 1000 \mu\text{m}$ (22%) dan saiz $500-1000 \mu\text{m}$ (13%).

Pengagregatan bahan organik dan tak organik serta aktiviti mikrob pada permukaan mikroplastik meningkatkan ketumpatan dan termendap ke dalam sedimen teras (Zhang 2017). Kajian pemodelan Besseling et al. (2017) menunjukkan pengagregatan partikel tanah liat bentonit meningkatkan ketumpatan mikroplastik dan membentuk biofilm pada permukaan mikroplastik dan menyebabkan mikroplastik mendap dalam sedimen. Proses pemendapan menyumbang kepada taburan tidak sekata julat saiz mikroplastik (Matsuguma et al. 2017). Purata julat saiz



RAJAH 2. Kelimpahan mikroplastik dalam sedimen teras (a) stesen SP1 dan (b) stesen SP2 pada kedalaman berbeza

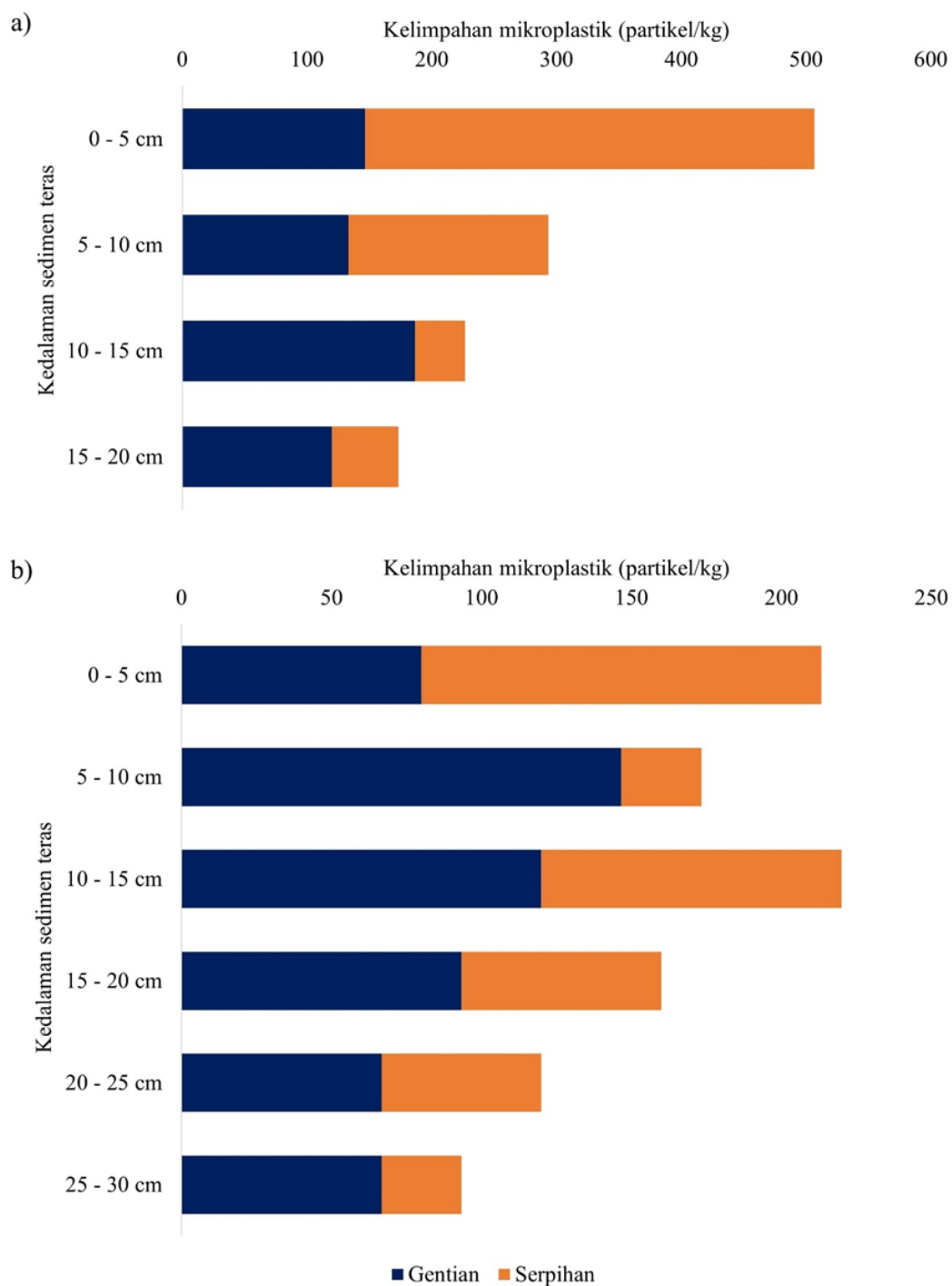
JADUAL 3. Mikroplastik dalam sedimen muara daripada kajian ini dan kajian lepas

Kawasan kajian	Jumlah mikroplastik (partikel/kg)	Saiz mikroplastik (μm)	Bentuk mikroplastik	Rujukan
Kuala Gula, Malaysia	2.5 – 130.0	< 500	Gentian & serpihan	Mohamed et al. (2023)
Hai Phong, Vietnam	0 - 3150	300 - 5000	Gentian	Linh et al. (2023)
Tien Yen, Vietnam	0 – 815	300 – 5000	N/A	Dung et al. (2021)
Sungai Merah, Vietnam	0 – 4941	300 – 5000	N/A	Dung et al. (2021)
Songkhla, Thailand	106 – 413	< 1000	Gentian & selaput	Pradit et al. (2022)
Pattani, Thailand	108 – 180	< 1000	Gentian	Pradit et al. (2022)
Shandong, China	2.5 – 27.5	100 - 490	Gentian	Zheng et al. (2020)
Hebei, China	212 - 1049	100 - 500	Serpihan & gentian	Zhou et al. (2021)
Tasmania, Australia	2430 (sampel A), 4200 (sampel B)	63 - 1000	Gentian	Willis et al. (2017)

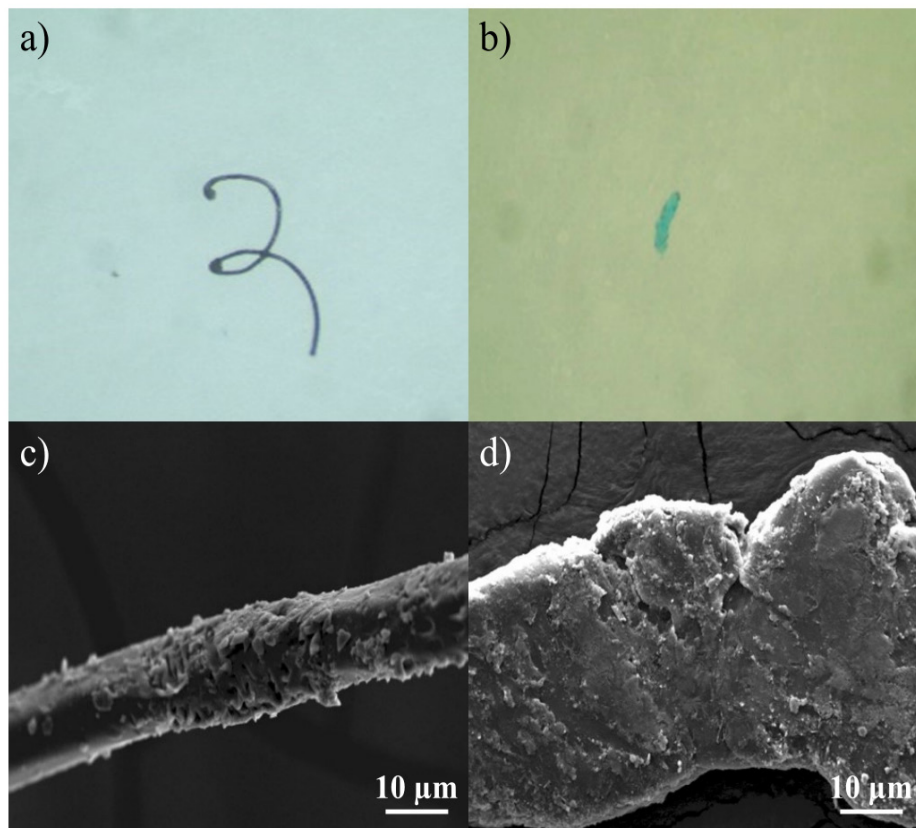
mikroplastik yang kerap dijumpai adalah sekitar saiz kurang daripada 1000 μm (Zheng et al. 2020). Namun, beberapa kajian lepas menemui julat saiz mikroplastik kurang daripada 500 μm (Mohamed et al. 2023; Willis et al. 2017; Zheng et al. 2020; Zhou et al. 2021).

Empat warna mikroplastik telah dikenal pasti dalam sedimen teras iaitu warna biru, lut sinar, hitam dan merah. Dalam sedimen teras stesen SP1, peratusan warna mikroplastik tertinggi ditemui ialah biru, 79%, diikuti oleh

hitam 9%, merah 8% dan lut sinar 4%. Daripada 79%, sedimen permukaan iaitu 0-5 cm adalah penyumbang tertinggi kepada kelimpahan mikroplastik biru. Bagi sedimen teras stesen SP2 pula, peratus warna tertinggi dijumpai juga warna biru, iaitu sebanyak 87%, diikuti dengan warna merah (7%) dan warna hitam dan lut sinar (3%). Didapati warna biru adalah warna paling dominan ditemui pada kedalaman 10-15 cm. Rajah 6 menunjukkan kelimpahan warna mikroplastik dijumpai pada kedalaman



RAJAH 3. Kelimpahan bentuk mikroplastik dalam sedimen teras (a) stesen SP1 dan (b) stesen SP2 pada kedalaman berbeza

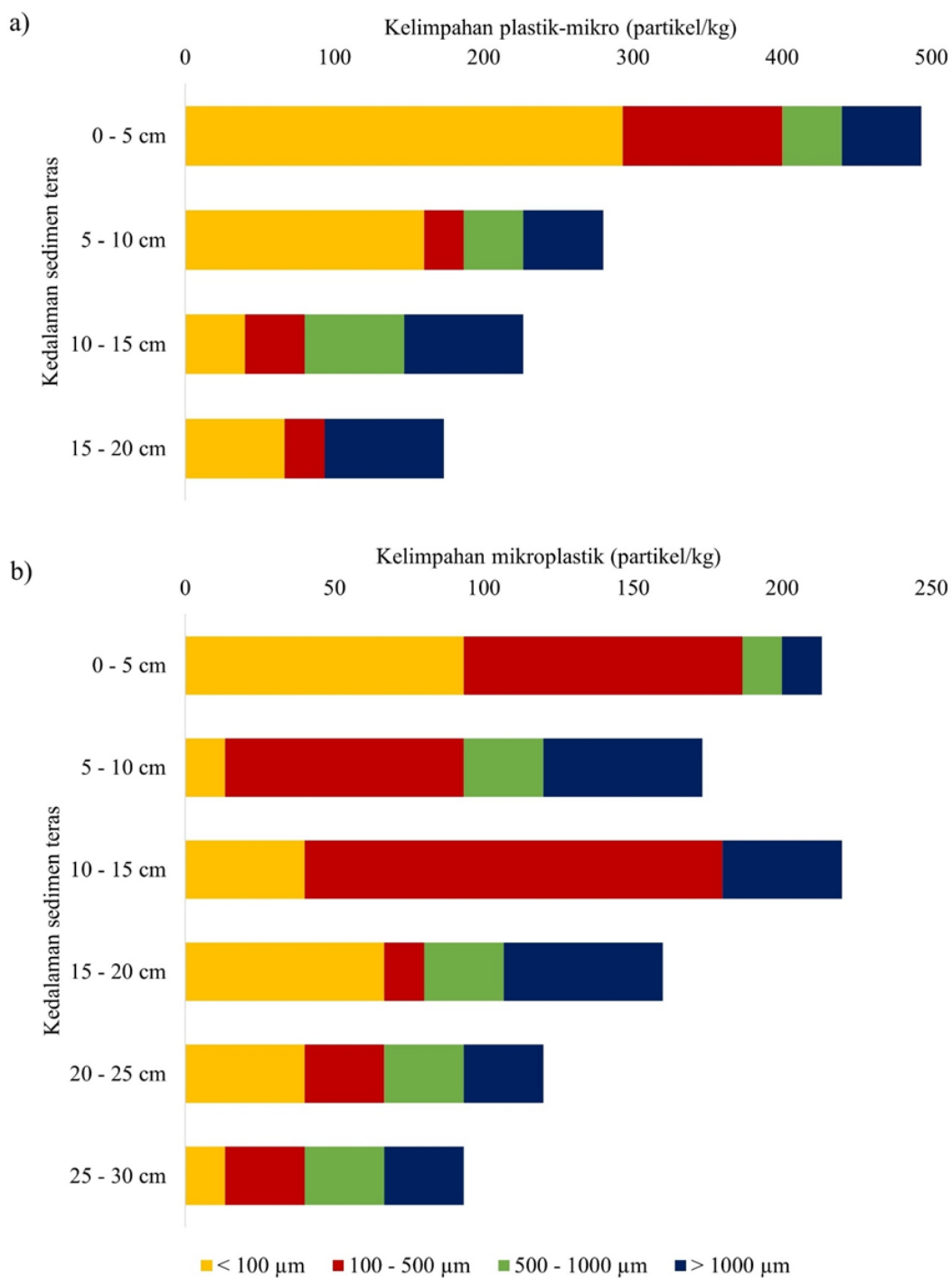


RAJAH 4. Morfologi bentuk gentian dan serpihan di bawah mikroskop-stereo (a,b) dan SEM (c,d)

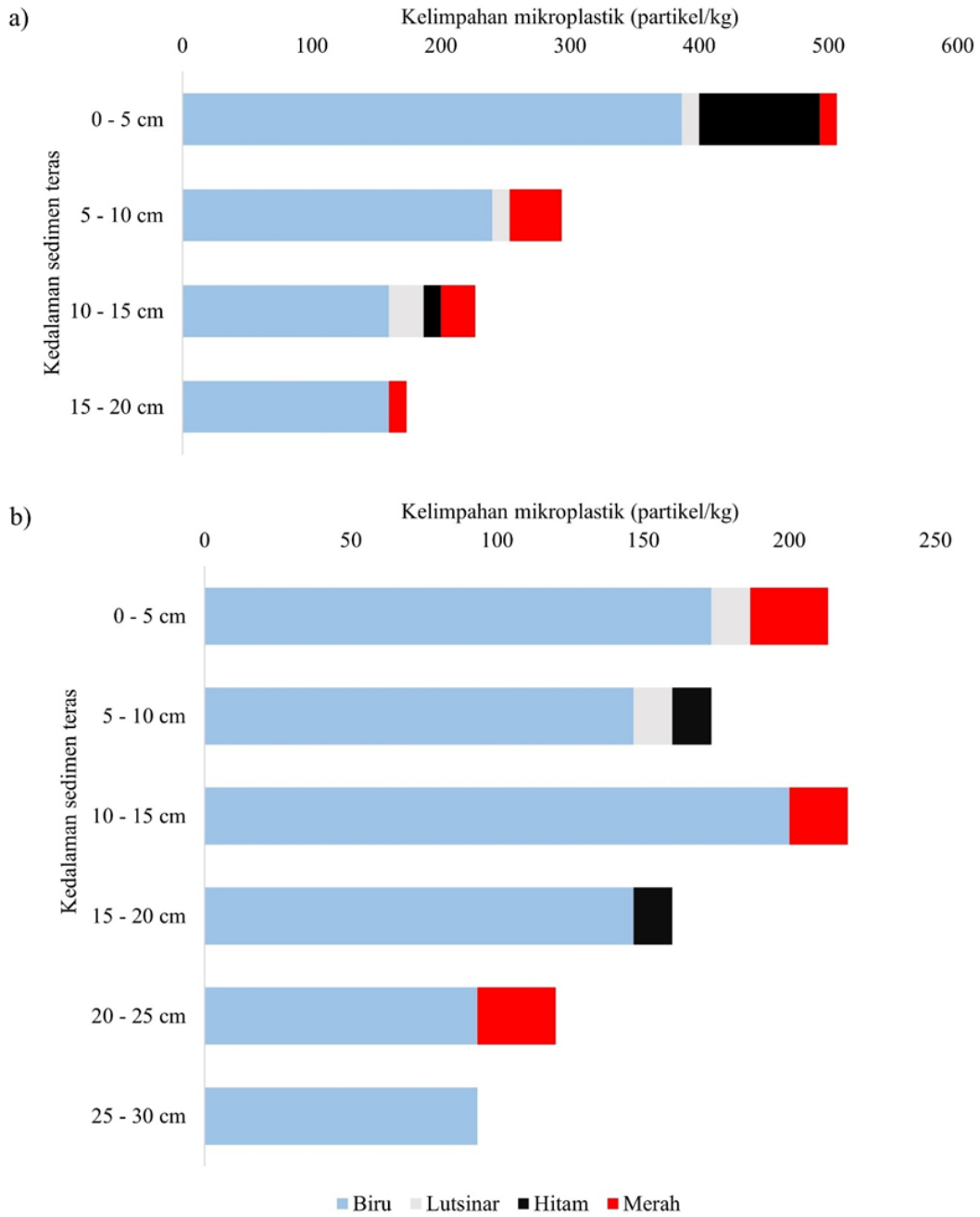
berbeza dalam stesen SP1 dan SP2. Peratus keseluruhan warna mikroplastik dijumpai dalam sedimen teras daripada paling tinggi hingga rendah adalah warna: biru (82%) > merah (8%) > hitam (6%) > lutsinar (4%). Kebanyakan partikel berwarna dijumpai menandakan partikel tersebut datangnya daripada degradasi plastik besar (Zhao, Zhu & Li 2015). Mikroplastik berwarna biru berasal daripada pelbagai sumber antropogen. Sumber-sumber ini termasuk penguraian bahan plastik berwarna, tekstil, bahan pembungkusan dan bahan lain yang boleh masuk ke dalam persekitaran air melalui proses larian, pelupusan terus atau proses pengendapan atmosfera (Deng et al. 2017; Li et al. 2019).

Bagi analisis polimer, sebanyak 12% mikroplastik yang bersaiz > 1000 μm telah dipilih secara rawak daripada kedua-dua stesen persampelan bagi menentukan jenis polimer di bawah spektroskopi μ-RAMAN. Tiga polimer telah dijumpai, iaitu polimer polietilena tereftalat (PET), poliester (PES) dan poliakrilamida (PAM). Rajah 7 menunjukkan spektrum polimer yang dijumpai dalam sedimen teras. Keseluruhan peratus polimer yang dijumpai

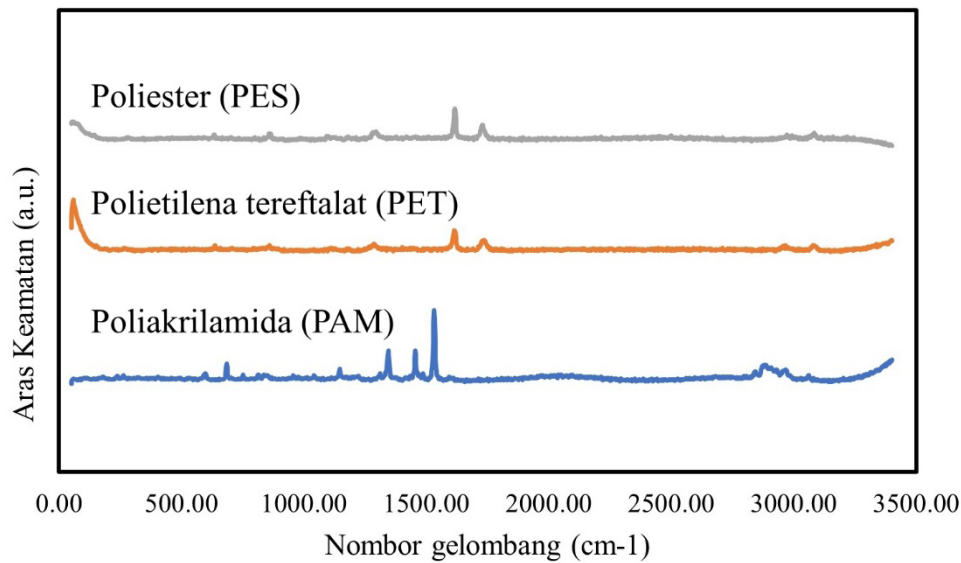
adalah 56% PET, diikuti dengan 39% PES dan 5% PAM. Polimer PET adalah polimer biasa dijumpai dalam botol minuman bahan pembungkusan dan gentian pakaian adalah penyumbang penting kepada pencemaran muara kerana ketahanannya terhadap degradasi dengan setiap tahun sebanyak 36 juta tan polimer PET telah dihasilkan (Khairul Anuar et al. 2022; Khalil et al. 2022). Stesen SP1 dan SP2 yang terletak dengan kawasan pelabuhan antarabangsa juga antara sumber kepada kehadiran mikroplastik PET yang mungkin menunjukkan sumbangan daripada aktiviti maritim dan operasi berkaitan penghantaran. Polimer PES mencatatkan peratusan kedua tertinggi dijumpai dalam sedimen teras. Kehadiran mikroplastik PES dalam sedimen muara berkemungkinan disebabkan oleh gabungan beberapa faktor seperti sisa buangan daripada pakaian. Zaki et al. (2021) dan Taha et al. (2021) mendapati bahawa muara Sungai Klang dan muara Terengganu masing-masing menerima mikroplastik dari kawasan bandar dan industri, termasuk pelabuhan dan kawasan kediaman.



RAJAH 5. Kelimpahan julat saiz mikroplastik dalam sedimen teras (a) stesen SP1 dan (b) stesen SP2 pada kedalaman berbeza



RAJAH 6. Kelimpahan warna mikroplastik dalam sedimen teras (a) stesen SP1 dan (b) stesen SP2 pada kedalaman berbeza



RAJAH 7. Spektra polimer dijumpai dalam sedimen teras muara Sungai Pulai

KESIMPULAN

Kajian ini membuktikan bahawa terdapat kehadiran mikroplastik dalam sedimen teras di muara Sungai Pulai. Kelimpahan mikroplastik dalam kedua-dua sedimen teras berbeza mengikut kedalaman teras dengan kelimpahan mikroplastik tertinggi adalah pada lapisan permukaan (0-5 cm) bagi stesen SP1 dan lapisan pertengahan (10-15 cm) bagi stesen SP2. Sumber utama yang menyumbang kepada kelimpahan mikroplastik adalah daripada kegiatan manusia dijalankan sekitar kawasan kajian. Julat saiz mikroplastik paling dominan dijumpai dalam sedimen teras adalah saiz kurang daripada 500 μm . Kedua-dua bentuk mikroplastik dijumpai dalam kajian ini dengan 51% bentuk serpihan pada stesen SP1 dan 58% bentuk gentian pada stesen SP2. Mikroplastik dalam sedimen teras datang daripada sumber sekunder iaitu degradasi plastik besar daripada pelbagai fenomena termendap pada sedimen teras. Polimer tertinggi ditemui dalam sedimen teras adalah PET dengan penggunaan polimer ini biasanya boleh didapati dalam penghasilan botol minuman, bahan pembungkusan dan gentian pakaian.

PENGHARGAAN

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pengajian Tinggi atas pemberian geran Skim Geran Penyelidikan Fundamental (FRGS) bagi membiayai kajian ini (FRGS/1/2020/WAB02/UKM/02/5).

RUJUKAN

- Andrady, A.L. 2017. The plastic in microplastics: A review. *Marine Pollution Bulletin* 119(1): 12-22.
- Auta, H.S., Emenike, C.U. & Fauziah, S.H. 2017. Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions. *Environment International* 102: 165-176.
- Bergmann, M., Mützel, S., Primpke, S., Tekman, M.B., Trachsel, J. & Gerdt, G. 2019. White and wonderful? Microplastics prevail in snow from the Alps to the Arctic. *Science Advances* 5(8). <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aax1157>
- Besseling, E., Quik, J.T.K., Sun, M. & Koelmans, A.A. 2017. Fate of nano- and microplastic in freshwater systems: A modeling study. *Environmental Pollution* 220: 540-548.
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C. & Galloway, T.S. 2011. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin* 62(12): 2588-2597.
- Deng, Y., Zhang, Y., Lemos, B. & Ren, H. 2017. Tissue accumulation of microplastics in mice and biomarker responses suggest widespread health risks of exposure. *Scientific Reports* 7: 46687.
- Dung, L.V., Duc, T.H., Linh, L.T.K., Ly, T.T.D., Duong, H.A. & Hao, N.T.M. 2021. Depth profiles of microplastics in sediment cores from two mangrove forests in northern Vietnam. *Journal of Marine Science and Engineering* 9(12): 1381.

- Fan, Y., Zheng, K., Zhu, Z., Chen, G. & Peng, X. 2019. Distribution, sedimentary record, and persistence of microplastics in the Pearl River catchment, China. *Environmental Pollution* 251: 862-870.
- Ganesh Kumar, A., Anjana, K., Hinduja, H., Sujitha, K. & Dharani, G. 2020. Review on plastic wastes in marine environment - Biodegradation and biotechnological solutions. *Marine Pollution Bulletin* 150: 110733.
- Gardel, A., Anthony, E.J., Santos, V.F., Huybrechts, N., Lesourd, S., Sottolichio, A. & Maury, T. 2022. A remote sensing-based classification approach for river mouths of the Amazon-influenced Guianas coast. *Regional Environmental Change* 22(2): 65.
- Hartmann, N.B., Hüffer, T., Thompson, R.C., Hassellöv, M., Verschoor, A., Daugaard, A.E., Rist, S., Karlsson, T., Brennholt, N., Cole, M., Herrling, M.P., Hess, M.C., Ivleva, N.P., Lusher, A.L. & Wagner, M. 2019. Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris. *Environmental Science and Technology* 53(3): 1039-1047.
- 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 and Technology* 46(6): 3060-3075.
- Ibrahim, N.A., Anuar, M.H.H., Mazlan, M.A., Ahmad Nahar, A.M., Syed Alian, S.N.N., Zakaria, N.A., Hashim, M.A. & Ahmad Kamil, K. 2022. Abundance, uptake, presence and biodegradation of microplastics in Malaysian context: A systematic literature review. *Journal of Sustainability Science and Management* 17(2): 221-239.
- Khairul Anuar, N.F.S., Huyop, F., Ur-Rehman, G., Abdullah, F., Normi, Y.M., Sabullah, M.K. & Wahab, R.A. 2022. An overview into polyethylene terephthalate (PET) hydrolases and efforts in tailoring enzymes for improved plastic degradation. *International Journal of Molecular Sciences* 23(20): 12644.
- Khalil, K., Aqma, W.S., Yasin, N.H.M., Maskat, M. Y. & Ahmad, I. 2022. Potensi bioremediasi plastik polietilena tereftalat (PET). *Sains Malaysiana* 51(9): 3081-3094.
- Kurniawan, S.B., Said, N.S.M., Imron, M.F. & Abdullah, S.R.S. 2021. Microplastic pollution in the environment: Insights into emerging sources and potential threats. *Environmental Technology and Innovation* 23: 101790.
- Lau, W. & Murphy, M. 2021. *Microplastics Are a Big—and Growing—Part of Global Pollution*. <https://www.pewtrusts.org/en/research-and-analysis/articles/2021/03/30/microplastics-are-a-big-and-growing-part-of-global-pollution> (Diakses pada 10 Oktober 2023).
- Lenaker, P.L., Baldwin, A.K., Corsi, S.R., Mason, S.A., Reneau, P.C. & Scott, J.W. 2019. Vertical distribution of microplastics in the water column and surficial sediment from the Milwaukee River Basin to Lake Michigan. *Environmental Science and Technology* 53(21): 12227-12237.
- Linh, L.T.K., Duong, H.A., Duc, T.H., Tue, N.T. & Dung, L.V. 2023. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1226: 012005.
- Li, J., Yang, D., Li, L., Jabeen, K. & Shi, H. 2015. Microplastics in commercial bivalves from China. *Environmental Pollution* 207: 190-195.
- Li, R., Zhang, L., Xue, B. & Wang, Y. 2019. Abundance and characteristics of microplastics in the mangrove sediment of the semi-enclosed Maowei Sea of the South China Sea: New implications for location, rhizosphere, and sediment compositions. *Environmental Pollution* 244: 685-692.
- Malli, A., Corella-Puertas, E., Hajjar, C. & Boulay, A.M. 2022. Transport mechanisms and fate of microplastics in estuarine compartments: A review. *Marine Pollution Bulletin* 177: 113553.
- Matsuguma, Y., Takada, H., Kumata, H., Kanke, H., Sakurai, S., Suzuki, T., Itoh, M., Okazaki, Y., Boonyatumanond, R., Zakaria, M.P., Weerts, S. & Newman, B. 2017. Microplastics in sediment cores from Asia and Africa as indicators of temporal trends in plastic pollution. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 73(2): 230-239.
- Meijer, L.J.J., van Emmerik, T., van der Ent, R., Schmidt, C. & Lebreton, L. 2021. More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean. *Science Advances* 7(18). <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aaz5803>
- Mohamed, C.A.R., Shahrudin, A.N., Pradit, S., Loh, P.S., Nitiratsuwan, T., Kobkeathawin, T., Noppradit, P., Le, T.P.Q., Oeurng, C., Sok, T., Lee, C.W., Bong, C.W., Lu, X., Anshari, G.Z., Kandasamy, S. & Wang, J. 2023. Depth profiles of microplastic in sediment cores in the mangrove area of Kuala Gula Mangrove, Malaysia. *Journal of Marine Science and Engineering* 11(6): 1223.
- Niu, J., Gao, B., Wu, W., Peng, W. & Xu, D. 2022. Occurrence, stability and source identification of small size microplastics in the Jiayan Reservoir, China. *Science of The Total Environment* 807: 150832.
- Peng, G., Zhu, B., Yang, D., Su, L., Shi, H. & Li, D. 2017. Microplastics in sediments of the Changjiang Estuary, China. *Environmental Pollution* 225: 283-290.
- Peng, Y., Wu, P., Schartup, A.T. & Zhang, Y. 2021. Plastic waste release caused by COVID-19 and its fate in the global ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 118(47): e2111530118.

- Pradit, S., Noppradit, P., Loh, P.-S., Nitiratsuwana, T., Le, T.P.Q., Oeurng, C., Mohamed, C.A.R., Lee, C.W., Lu, X., Anshari, G.Z., Kandasamy, S. & Wang, J. 2022. The occurrence of microplastics in sediment cores from two mangrove areas in Southern Thailand. *J. Mar. Sci. Eng.* 10(3): 418.
- Rakib, M.R.J., Hossain, M.B., Kumar, R., Ullah, M.A., Al Nahian, S., Rima, N.N., Choudhury, T.R., Liba, S.I., Yu, J., Khandaker, M.U., Sulieman, A. & Sayed, M.M. 2022. Spatial distribution and risk assessments due to the microplastics pollution in sediments of Karnaphuli River Estuary, Bangladesh. *Scientific Reports* 12: 8581.
- Renkema, A. & Kinlan, D. 2000. Tanjung Pelepas Port: From jungle to Malaysia's newest container port. *Terra et Aqua* 80: 3-11.
- Sarijan, S., Azman, S., Said, M.I.M., Andu, Y. & Zon, N.F. 2018. Microplastics in sediment from Skudai and Tebrau River, Malaysia: A preliminary study. *MATEC Web of Conferences* 250: 06012.
- Simon-Sánchez, L., Grelaud, M., Garcia-Orellana, J. & Ziveri, P. 2019. River Deltas as hotspots of microplastic accumulation: The case study of the Ebro River (NW Mediterranean). *Science of the Total Environment* 687: 1186-1196.
- Suardy, N.H., Tahrin, N.A. & Ramli, S. 2020. Analysis and characterization of microplastic from personal care products and surface water in Bangi, Selangor. *Sains Malaysiana* 49(9): 2237-2249.
- Suteja, Y., Atmadipoera, A.S., Riani, E., Nurjaya, I.W., Nugroho, D. & Cordova, M.R. 2021. Spatial and temporal distribution of microplastic in surface water of tropical estuary: Case study in Benoa Bay, Bali, Indonesia. *Marine Pollution Bulletin* 163: 111979.
- Taha, Z.D., Md Amin, R., Anuar, S.T., Nasser, A.A.A. & Sohaimi, E.S. 2021. Microplastics in seawater and zooplankton: A case study from Terengganu estuary and offshore waters, Malaysia. *Science of the Total Environment* 786: 147466.
- Tan, E. & Mohd Zanuri, N.B. 2023. Abundance and distribution of microplastics in tropical estuarine mangrove areas around Penang, Malaysia. *Frontiers in Marine Science* 10: 1148804.
- Willis, K.A., Eriksen, R., Wilcox, C. & Hardesty, B.D. 2017. Microplastic distribution at different sediment depths in an urban estuary. *Frontiers in Marine Science* 4: 419.
- Xue, B., Zhang, L., Li, R., Wang, Y., Guo, J., Yu, K. & Wang, S. 2020. Underestimated microplastic pollution derived from fishery activities and "hidden" in deep sediment. *Environmental Science and Technology* 54(4): 2210-2217.
- Zaki, M.R.M., Ying, P.X., Zainuddin, A.H., Razak, M.R. & Aris, A.Z. 2021. Occurrence, abundance, and distribution of microplastics pollution: An evidence in surface tropical water of Klang River estuary, Malaysia. *Environmental Geochemistry and Health* 43(9): 3733-3748.
- Zhang, H. 2017. Transport of microplastics in coastal seas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 199: 74-86.
- Zhao, S., Zhu, L. & Li, D. 2015. Microplastic in three urban estuaries, China. *Environmental Pollution* 206: 597-604.
- Zheng, Y., Li, J., Cao, W., Jiang, F., Zhao, C., Ding, H., Wang, M., Gao, F. & Sun, C. 2020. Vertical distribution of microplastics in bay sediment reflecting effects of sedimentation dynamics and anthropogenic activities. *Marine Pollution Bulletin* 152: 110885.
- Zhou, Z., Zhang, P., Zhang, G., Wang, S., Cai, Y. & Wang, H. 2021. Vertical microplastic distribution in sediments of Fuhe River estuary to Baiyangdian Wetland in Northern China. *Chemosphere* 280: 130800.
- Ziajahromi, S., Neale, P.A. & Leusch, F.D.L. 2016. Wastewater treatment plant effluent as a source of microplastics: Review of the fate, chemical interactions and potential risks to aquatic organisms. *Water Science and Technology* 74(10): 2253-2269.
- Zobkov, M., Zobkova, M., Galakhina, N. & Efremova, T. 2020. Method for microplastics extraction from Lake sediments. *MethodsX* 7: 101140.

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