

**KAJIAN CEMARAN MIKROPLASTIK PADA SUNGAI-SUNGAI
DI KOTA MAKASSAR SERTA DAMPAKNYA
TERHADAP IKAN KOMERSIAL**

*Study on Microplastic Pollution in Rivers of Makassar City
and its Impact on Commercial Fish*

Ega Adhi Wicaksono



**PROGRAM DOKTORAL ILMU PERIKANAN
FAKULTAS ILMU KELAUTAN DAN PERIKANAN
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2021**

**KAJIAN CEMARAN MIKROPLASTIK PADA SUNGAI-SUNGAI
DI KOTA MAKASSAR SERTA DAMPAKNYA
TERHADAP IKAN KOMERSIAL**

*Study on Microplastic Pollution in Rivers of Makassar City
and its Impact on Commercial Fish*

Ega Adhi Wicaksono

L013181011

DISERTASI

Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Doktor

**PROGRAM DOKTORAL ILMU PERIKANAN
FAKULTAS ILMU KELAUTAN DAN PERIKANAN
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2021**

HALAMAN PENGESAHAN DISERTASI

**Kajian Cemaran Mikroplastik pada Sungai-Sungai di Kota Makassar
Serta Dampaknya Terhadap Ikan Komersial**

Disusun dan Diajukan oleh:

**EGA ADHI WICAKSONO
L013181011**

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Promotor,



**Prof. Dr. Akbar Tahir, M. Sc.
NIP. 19610718 198810 1 001**

Co. Promotor,



**Dr. Ir. Shinta Werorilangi, M. Sc.
NIP. 19670826 199103 2 001**

Co. Promotor,



**Prof. Tamara S. Galloway
NIP.**

**Ketua Program Studi
S3 Ilmu Perikanan,**



**Prof. Dr. Ir. Sherfuddin Bin Andy Omar, M. Sc.
NIP. 19590223 198811 1 001**



**Dekan Fakultas Ilmu Kelautan
dan Perikanan,**

**Dr. St. Aisiah Farhum, M. Si
NIP. 19690605 199303 2 002**

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ega Adhi Wicaksono
NIM : L013181011
Program Studi : Ilmu Perikanan
Fakultas : Ilmu Kelautan dan Perikanan

Menyatakan bahwa disertasi dengan judul: "Kajian Cemaran Mikroplastik pada Sungai-sungai di Kota Makassar Serta Dampaknya Terhadap Ikan Komersial". Ini adalah karya penelitian saya sendiri dan bebas dari plagiasi. Di dalamnya tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik, juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali digunakan sebagai acuan dalam naskah ini, yang artinya sumber disebutkan sebagai referensi dan dituliskan pula di Daftar Pustaka. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiasi dalam karya ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan peraturan perundang-undangan terkait (Permendiknas No. 17, tahun 2007).

Makassar, Agustus 2021



Ega Adhi Wicaksono
L013181011

Kata Pengantar

Bismillahirrahmanirrahim

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya. Shalawat dan salam juga penulis panjatkan kepada Nabi besar Muhammad SAW yang selalu menjadi suri teladan bagi kita semua. Syukur alhamdulillah penulis dapat menyelesaikan disertasi berjudul "Kajian Pencemaran Mikroplastik pada Sungai-Sungai di Kota Makassar Serta Dampaknya Terhadap Ikan Komersial" dengan baik. Disertasi ini ditulis sebagai tugas akhir untuk memperoleh gelar Doktor pada Program Doktor Ilmu Perikanan, Fakultas Ilmu Kelautan dan Perikanan, Universitas Hasanuddin.

Penelitian ini dilaksanakan secara bertahap pada tahun 2018-2021. Pendanaan penelitian ini diperoleh dari program magister menuju doktor untuk sarjana unggul (PMDSU) *batch* ke-3. Hasil penelitian ini telah dipublikasi dalam bentuk artikel ilmiah pada 3 jurnal internasional bereputasi terindeks SCOPUS, dan 1 prosiding internasional. Penelitian ini juga sudah dipresentasikan pada seminar internasional MSAT 2nd pada Agustus 2019 dan MARSAVE 2nd pada Oktober 2020.

Penulis menyadari bahwa disertasi ini tidak mungkin terwujud tanpa adanya bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Akbar Tahir, M. Sc. selaku promotor, serta Dr. Ir. Shinta Werorilangi, M.Sc. dan Prof. Tamara S. Galloway sebagai ko-promotor atas segala nasihat, bantuan dan bimbingan yang telah diberikan semenjak penulis memulai program S3 hingga selesainya disertasi ini.
2. Tim penguji, Dr. Ir. Khusnul Yaqin, M. Sc.; Prof. Rachman Syah, M.S.; Dra. Paulina Taba, M. Sc, M.Phil., Ph.D.; dan Prof. Dr. Anwar Daud, SKM, M.Kes. yang telah banyak memberikan saran dan perbaikan;
3. Dr. Ir. St. Aisjah Farhum, M. Si. selaku dekan FIKP UNHAS
4. Prof. Dr. Ir. Sharifuddin Bin Andy Omar, M. Sc. selaku ketua program studi Doktor Ilmu Perikanan atas segala nasihat dan arahan selama penulis berstatus sebagai mahasiswa doktor.
5. Kedua orang tua yang telah memberikan motivasi dan doa serta dukungan rohani kepada penulis
6. Kuasa Sari, S. Kel. sebagai orang pertama yang memberikan pembelajaran dan pemahaman kepada penulis mengenai proses pengamatan mikroplastik di laboratorium

7. Amriana, S.Pi; Amri Yusuf, S. Pi, M.Si.; Anugerah Saputra, S.Pi, M.Si. sebagai rekan penulis saat melakukan pengambilan data survei.
8. Rekan-rekan laboran lab produktivitas perairan FIKP UNHAS, atas segala dukungan moral, motivasi dan kesempatan belajar saat penulis melakukan penelitian
9. Teman-teman Magister Program Studi Ilmu Perikanan 2017, Doktor Program Studi Ilmu Perikanan 2018, serta rekan PMDSU UNHAS *Batch 3*.
10. Rekan diskusi di laboratorium Ekotoksikologi Laut FIKP UNHAS yang selalu berganti setiap minggunya, atas segala *insight* dan keterbukaan pemikirannya terhadap isu pencemaran plastik

Penulis menyadari bahwa penulisan disertasi ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis dengan hati dan tangan terbuka mengharapkan saran dan kritik membangun demi kesempurnaan tulisan yang akan datang.

Makassar, Agustus 2021

Ega Adhi Wicaksono

Daftar Isi

Halaman Pengesahan Disertasi	i
Kata Pengantar	ii
Daftar Isi	iv
Daftar Tabel	vi
Daftar Gambar	vii
Daftar Lampiran	viii
Daftar Artikel	ix
I. Pendahuluan Umum	1
A. Latar Belakang	1
B. Plastik dan cemaran MP secara global	5
C. Perkembangan penelitian MP di Indonesia	7
D. Kota Makassar Sebagai Lokasi Studi Pencemaran MP	10
E. Rumusan Masalah, Tujuan Penelitian, Hipotesis, dan Novelti Penelitian ..	12
1. Kerangka pikir dan rumusan masalah	12
2. Tujuan penelitian	13
3. Novelti Penelitian	14
F. Kerangka Disertasi	14
II. Profil Pencemaran Mikroplastik pada Air dan Sedimen di Sungai-sungai Kota Makassar	16
Abstrak	16
A. Pendahuluan	16
B. Metode Penelitian	18
1. Lokasi Studi	18
2. Metode pengambilan sampel	19
C. Hasil	23
D. Pembahasan	28
E. Kesimpulan dan Saran/Rekomendasi	33
III. Keberadaan Mikroplastik pada Biota Perairan Hasil Tangkapan di Sungai-sungai Kota Makassar	35
Abstrak	35
A. Pendahuluan	35
B. Metode Penelitian	36
1. Persetujuan komisi etik	36
2. Lokasi studi dan koleksi sampel	36

3. Metode isolasi dan identifikasi MP pada biota	38
4. Kontrol kontaminasi.....	39
5. Analisis Data	40
C. Hasil.....	40
1. Kontrol kontaminasi.....	40
2. Kelimpahan MP pada sampel.....	40
3. Profil warna, bentuk, ukuran dan polimer MP pada biota perairan di lokasi studi	43
D. Pembahasan.....	45
E. Kesimpulan dan Saran/Rekomendasi.....	51
IV. Uji Toksisitas Mikroplastik Polietilena pada Ikan Nila (<i>Oreochromis niloticus</i>) Ditinjau Dari Profil Sel Darah Putih dan Histopatologi Organ Usus dan Hati.....	53
Abstrak	53
A. Pendahuluan	53
B. Metode Penelitian	54
1. Persetujuan komisi etik	54
2. Persiapan hewan uji.....	55
3. Persiapan bahan uji	55
4. Desain Eksperimen	56
5. Pengambilan darah dan pembuatan sediaan apus darah	57
6. Pembuatan preparat jaringan (parameter histopatologi)	58
7. Analisis Data	60
C. Hasil.....	61
1. Kandungan logam timbal pada bahan uji	61
2. Sintasan dan laju pertumbuhan spesifik.....	61
3. Gambaran sel darah putih	62
4. Gambaran histopatologi pada organ usus dan hati ikan.....	63
D. Pembahasan.....	66
E. Kesimpulan dan Saran/Rekomendasi.....	70
V. Pembahasan Umum.....	71
VI. Kesimpulan Umum dan Rekomendasi	76
A. Kesimpulan umum.....	76
B. Rekomendasi.....	76
Daftar Pustaka.....	77
Lampiran.....	89

RINGKASAN

Ega Adhi Wicaksono. L013181011. “Kajian Cemaran Mikroplastik Pada Sungai-Sungai di Kota Makassar Serta Dampaknya Terhadap Ikan Komersial” dibimbing oleh **Akbar Tahir** sebagai promotor dan **Shinta Werorilangi** sebagai co-promotor I, **Tamara Susan Galloway** sebagai co-promotor II.

Mikroplastik (MP) saat ini sudah menjadi salah satu masalah global, terutama dalam bidang pencemaran perairan. Saat ini MP sudah ditemukan pada berbagai lingkungan perairan, akan tetapi penelitian saat ini masih hanya berfokus pada lingkungan laut. Sehingga penelitian mengenai pencemaran MP di lingkungan sungai menjadi penting untuk dilakukan. Kota Makassar merupakan kota besar berpenduduk 1,5 juta jiwa yang berpotensi memberikan masukan MP pada lingkungan sungainya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi profil pencemaran MP di sungai-sungai Kota Makassar, baik pada kompartemen air, sedimen, maupun biota perairan. Berdasarkan hasil penelitian, kelimpahan MP pada sampel air berkisar antara $0,6 \pm 0,1$ – $3,3 \pm 1,2$ MP/m³ ($\bar{x} \pm SD$) dan $16,7 \pm 12,1$ - $150 \pm 20,9$ MP/kg pada sampel sedimen. Distribusi spasial MP di Sungai Tallo secara umum berbeda dengan yang ada di Sungai Jeneberang. Kelimpahan MP di Sungai Tallo cenderung lebih tinggi di lokasi muara dan rendah di hulu, sebaliknya di Sungai Jeneberang kelimpahan MP cenderung lebih tinggi di hulu. Secara umum, kelimpahan MP di kedua sungai lebih tinggi pada musim kemarau. Biota perairan yang ada di kedua sungai juga sudah terkontaminasi oleh MP dengan kelimpahan berkisar antara $0,6 \pm 0,3$ – $2,5 \pm 0,7$ MP/individu ($\bar{x} \pm SE$). Ikan dengan kebiasaan makan herbivor secara umum memiliki kelimpahan MP lebih tinggi dibandingkan dengan ikan karnivor. Berdasarkan uji eksperimental, keberadaan MP pada diet ikan dapat memberikan dampak berupa peningkatan jumlah sel darah putih dan proporsi sel monosit, dan juga dapat menimbulkan kerusakan pada organ usus dan hati ikan. Hal ini kemudian dapat berujung pada perlambatan pertumbuhan dan pengurangan nilai sintasan. Keberadaan MP pada sungai-sungai di Kota Makassar harus menjadi perhatian pihak terkait untuk mencegah pencemaran MP untuk lebih memburuk di masa yang akan datang.

Summary

Ega Adhi Wicaksono. L013181011. “Study on Microplastic Pollution in Rivers of Makassar City and its impact on commercial fish” supervised by Akbar Tahir as promotor and Shinta Werorilangi as co-promotor I, Tamara Susan Galloway as co-promotor II.

Microplastics (MPs) have now become a global problem, especially in the field of water pollution. Currently, MPs have been found in various aquatic environments, but the current research is still only focused on the marine environment. Therefore, research on MP pollution in the riverine environment is important. Makassar City, with a population of 1.5 million people, can provide potential input of MPs to its river environment. This study aimed to evaluate the profile of MPs pollution in the rivers of Makassar City, in the water, sediment, and aquatic biota compartments. Based on the results of the study, the abundance of MPs in water samples ranged from 0.6 ± 0.1 – 3.3 ± 1.2 MP/m³ ($\bar{x} \pm SD$) and 16.7 ± 12.1 - 150 ± 20.8 MP/ kg on sediment samples. The spatial distribution of MP in the Tallo River is generally different from that in the Jeneberang River. The abundance of MP in the Tallo River tends to be higher in the estuary and low in the upstream, on the contrary, in the Jeneberang River, the abundance of MPs tends to be higher in the upstream. In general, the MPs abundance in both rivers was higher in the dry season. Aquatic biota in both rivers has also been contaminated with MPs abundance ranging from 0.6 ± 0.3 – 2.5 ± 0.7 MPs/individual ($\bar{x} \pm SE$). Herbivorous fish generally had higher MPs abundance than carnivorous fish. Based on experimental tests, the presence of MPs in the fish diet can increase white blood cell count and the proportion of monocytes. Microplastics can also cause damage to the intestines and liver in fish. Microplastics may lead to a slower growth rate and reduced survival. The presence of MP in rivers of Makassar City should be of concern for related parties to prevent MPs pollution from getting worse in the future.

I. Pendahuluan Umum

A. Latar Belakang

Pencemaran plastik di lingkungan perairan telah menjadi salah satu masalah global. Saat ini keberadaan sampah plastik yang dihasilkan dari kegiatan antropogenik dapat ditemukan pada berbagai jenis ekosistem perairan (Dris et al. 2015). Cemarannya plastik di lingkungan laut dapat mencapai jumlah yang sangat besar. Secara global diperkirakan ada sekitar 275 juta metrik ton sampah plastik yang dihasilkan oleh lebih dari 190 negara pesisir pada tahun 2010, dengan perkiraan 4,8 hingga 12,7 juta metrik ton sampah plastik tersebut terbuang dan berakhir di lingkungan laut (Jambeck et al. 2015). Sampah plastik yang masuk ke laut dapat terdiri dari berbagai jenis ukuran, mulai dari yang berukuran besar hingga yang berukuran kecil. Sampah plastik dengan ukuran besar secara umum dapat terkena pengaruh lingkungan seperti peningkatan temperatur, paparan UV-B dan tekanan mekanik, kemudian terpecah menjadi bentuk plastik dengan ukuran yang lebih kecil (Corcoran et al. 2009; Permono 2018). Plastik dengan ukuran kecil (1 μm - 5 mm) kemudian digolongkan ke dalam istilah baru yang biasa disebut dengan "mikroplastik" (Thompson et al. 2004; Frias & Nash 2019). Mikroplastik (MP) yang masuk ke lingkungan sudah berada dalam ukuran kecil biasanya disebut dengan MP primer. Mikroplastik primer umumnya dapat berasal dari pelet plastik, produk perawatan pribadi dan kosmetik (Tabel 1). Kemudian juga terdapat MP sekunder yang berasal dari hasil pecahan plastik yang sudah ada di lingkungan (Cole et al. 2011). Mikroplastik saat ini mendapatkan perhatian khusus dalam bidang kajian pencemaran perairan karena sifat bahan pencemar yang unik dibandingkan dengan bahan pencemar lain.

Mikroplastik dengan ukurannya yang kecil, memberikan keunikan tersendiri dibandingkan dengan plastik ukuran yang lebih besar terhadap nasib dan dampaknya di ekosistem. Mikroplastik saat ini diketahui dapat menyerap zat-zat beracun dari lingkungan perairan seperti POPs, pestisida, dan logam (Mato et al. 2001; Klein 2015; Wang et al. 2018). Kemudian, zat-zat aditif internal yang ada pada plastik itu sendiri juga dapat bersifat beracun pada organisme (Rochman 2015). Mikroplastik yang memiliki ukuran kecil juga memiliki bentuk yang serupa seperti makanan alami dari organisme akuatik, sehingga organisme akuatik seperti ikan terkadang salah mengira MP sebagai salah satu makanannya. Ketika MP tersebut dikonsumsi oleh organisme akuatik, zat beracun yang ada dan teradsorpsi pada MP tersebut dapat terlepas kembali di dalam saluran cerna dan kemudian memberikan dampak buruk kepada organisme.

Tabel 1. Penggolongan MP primer dan sekunder berdasarkan sumbernya

Jenis Mikroplastik	Sumber Utama
Mikroplastik Primer	Produk perawatan pribadi dan kosmetik
	Produk kesehatan (pasta gigi/pemutih gigi)
	Kikisan plastik dari kegiatan industri
	Cairan dari kegiatan pengeboran
	Bahan dasar industri plastik (<i>Pellet</i> plastik)
Mikroplastik sekunder	Sampah plastik, timbunan sampah plastik
	Kikisan plastik dari tempat pembuangan sampah
	Alat tangkap ikan (tali dan pelampung plastik)
	Sampah laut dari kegiatan rekreasi dan kapal
	Plastik dari wadah kemasan
	Cat dan pewarna yang terkikis
	Serat plastik dari tekstil

Sumber : da Costa et al. 2017

Secara umum, Dris et al., (2015) menyatakan bahwa setidaknya terdapat empat dampak utama MP ketika dikonsumsi oleh organisme akuatik, yaitu (1) kerusakan mekanik pada organ akibat keberadaan fisik MP, (2) dampak buruk dari bahan toksik akibat adanya zat aditif internal pada MP, (3) dampak buruk cemaran yang diakibatkan serapan bahan toksik di lingkungan oleh MP, dan juga (4) penyebaran penyakit akibat MP yang dapat berfungsi sebagai vektor penyakit. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa MP telah dapat terakumulasi pada beberapa jenis organisme akuatik, seperti pada zooplankton (Cole et al. 2013), cacing laut (Wright, Rowe, et al. 2013), ikan (Lusher et al. 2013; Rochman et al. 2015) dan kerang (Li et al. 2015; Rochman et al. 2015). Keadaan ini kemudian dapat menjadi masalah besar apabila terakumulasinya MP kemudian meningkat pada level trofik di ekosistem melalui proses biomagnifikasi dan dapat berada pada komoditas akuatik penting yang dikonsumsi manusia (Rochman 2015).

Keberadaan MP di lingkungan laut telah banyak dilaporkan pada berbagai lokasi di dunia (Thompson et al. 2004; Cole et al. 2011). Walaupun keberadaan kelimpahan MP telah banyak ditemukan pada lingkungan laut, berdasarkan penelitian terbaru menyatakan bahwa sebagian besar MP di lingkungan laut diduga berasal dari lokasi daratan/terrestrial. Diprediksi bahwa sekitar 96% MP primer di laut berasal dari berbagai aktivitas yang berada di lokasi daratan dan hanya sekitar 4% MP berasal dari aktivitas di lingkungan laut itu sendiri (Boucher & Friot 2017). Pada laporan yang sama juga dinyatakan bahwa kegiatan di lokasi daratan yang menghasilkan proporsi MP terbesar di antaranya adalah dari kegiatan *laundry* dan pelepasan MP dari penggunaan ban kendaraan pada kegiatan transportasi, di mana kegiatan tersebut sangat terkait dengan

aktivitas manusia di lingkungan padat penduduk. Sumber MP sekunder juga banyak berasal dari lokasi daratan. Proses peningkatan temperatur dan paparan sinar UV-B yang bertanggungjawab dalam degradasi plastik pada umumnya terjadi pada lingkungan daratan dan pengaruhnya akan berkurang ketika sampah plastik tersebut sudah sampai ke lingkungan laut (Barnes et al. 2009). Mikroplastik yang berada di lokasi terestrial juga dapat terbawa angin dan berpindah ke udara. Keberadaan MP di udara ini kemudian berhubungan erat dengan aktivitas manusia di lingkungan sekitar, misalnya saja di Kota besar yang padat aktivitas manusia, kelimpahan MP di udara dapat mencapai 20 kali lipat lebih tinggi dari daerah terpencil (Wright et al. 2020). Mikroplastik yang berada di udara tersebut kemudian dapat juga terbawa angin dan masuk ke lingkungan perairan melalui *atmospheric fallout*. Akan tetapi, proporsi *input* MP terbesar menuju lautan dari udara masih jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan *input* MP yang berasal dari lingkungan sungai (Liu et al. 2020; Wang, Li, et al. 2020).

Sungai secara umum mendapatkan *input* MP langsung dari kegiatan buangan domestik, pertanian, pusat pengolahan air limbah dan juga air limpasan (Dris et al. 2015). Lebreton et al, (2017) menyatakan bahwa setidaknya 2,41 juta ton sampah plastik masuk ke laut per tahun melalui aliran sungai secara global. Masuknya plastik ke sungai itu juga diiringi dengan keberadaan MP di dalamnya. Misalnya saja pada Sungai Nakdong di China, pada sungai tersebut diperkirakan melepas lebih dari 110 ton MP setiap tahunnya, yang secara jumlah, setara dengan 11 miliar partikel MP (Eo et al. 2019). Secara global, dikatakan bahwa negara-negara dari region Asia Pasifik saat ini telah mengemisikan lebih dari 15.000 ton MP ke lingkungan pesisir dan laut per tahun, apabila tidak dilakukan perbaikan pada upaya pengoleksian ulang sampah padat dan pengelolaan air limbah maka jumlahnya diproyeksikan mencapai 25.000 ton MP per tahun pada tahun 2050 (van Wijnen et al. 2019).

Indonesia saat ini dituding sebagai negara kedua terbesar penyumbang sampah plastik ke lingkungan laut setelah China (Jambeck et al. 2015). Beberapa sungai di Indonesia juga masuk ke dalam daftar 20 besar sungai dengan emisi plastik terbanyak secara global, di antaranya adalah sungai Brantas, Solo, Serayu, dan Progo (Lebreton et al. 2017). Akan tetapi, dengan adanya potensi cemaran besar dari sampah plastik di Indonesia, penelitian yang mengkaji MP di Indonesia saat ini masih butuh banyak perkembangan. Sejauh ini penelitian MP di Indonesia kebanyakan masih hanya berfokus pada distribusi MP di lingkungan saja dan berdasarkan lokasi lebih banyak dilakukan di Indonesia Bagian Barat, sedangkan penelitian mengenai MP di lokasi Indonesia Timur masih jarang dilakukan (Purba et al. 2019; Alam & Rachmawati 2020). Terlebih lagi penelitian mengenai MP di Indonesia juga masih lebih banyak berfokus ke perairan laut,

padahal lingkungan sungai sebagai salah satu jalur utama MP untuk sampai ke Laut juga penting untuk dikaji lebih dalam.

Pelaporan mengenai adanya cemaran MP di perairan sungai Indonesia memang sudah beberapa kali dilakukan. Sungai Ciwalengke di Bandung misalnya, dilaporkan telah ditemukan MP di air dan sedimen akibat dari keberadaan pemukiman padat penduduk di sekitar lokasi sungai (Alam et al. 2019). kemudian di Sungai Surabaya, di mana juga ditemukan MP pada lingkungan sungainya yang kemudian disalurkan menuju lingkungan laut di pesisir Surabaya (Cordova et al. 2019; Firdaus et al. 2020; Lestari et al. 2020). Akan tetapi, kedua penelitian tersebut masih hanya berfokus pada distribusi MP pada kompartemen lingkungan seperti air dan sedimen. Penelitian itu masih belum memasukkan dampak dari keberadaan MP tersebut terhadap organisme akuatik penting yang ada di sungai-sungai tersebut.

Kota Makassar merupakan salah satu kota besar yang berada di Indonesia Timur, di mana pada lokasi ini penelitian mengenai MP masih sangat dibutuhkan. Meski begitu, penelitian MP di Kota Makassar memang sudah pernah beberapa kali dilakukan semenjak tahun 2014. Dilaporkan bahwa lingkungan laut di sekitar Kota Makassar telah tercemar oleh MP, baik pada air (Afdal et al. 2019; Tahir et al. 2020), sedimen (Tahir et al. 2020), ikan hasil tangkapan (Tahir & Rochman 2014; Rochman et al. 2015), bahkan hingga pada organisme trofik rendah seperti hewan bentos (Tahir et al. 2020). Akan tetapi, kajian mengenai MP yang ada di lingkungan sungai Kota Makassar belum banyak dilakukan. Padahal pengkajian mengenai potensi cemaran MP dari Sungai-sungai di Kota Makassar menjadi penting, mengingat sungai merupakan salah satu jalur utama masuknya cemaran MP ke lingkungan laut. Kota Makassar sendiri diapit oleh dua sungai besar, yaitu Sungai Tallo dan Sungai Jeneberang yang berlokasi di Utara dan Selatan kota secara berurutan. Penelitian MP pada kedua lokasi ini akan sangat penting untuk dilakukan, karena dapat menyediakan *baseline* data kondisi cemaran MP pada lingkungan sungai di Kota Makassar, sebagai perwakilan kota besar di Kawasan Indonesia Timur. Informasi ini kemudian dapat digunakan dalam langkah pengelolaan sampah padat di Kota Makassar, terutama pada pengelolaan sampah plastik.

Beberapa sub-bab selanjutnya akan memberikan paparan mengenai gambaran pencemaran plastik secara global dan nasional. Hal ini penting untuk memberikan gambaran yang lebih utuh terhadap kondisi kekinian dari status pencemaran MP. berbagai celah/*gaps* dalam penelitian MP juga akan dibahas, demikian juga terkait alasan mengapa Kota Makassar adalah salah satu lokasi yang menarik untuk dijadikan lokasi kajian cemaran MP. Kemudian bagian pendahuluan umum ini akan diakhiri dengan perumusan masalah, tujuan penelitian dan kebaruan yang diperoleh, sebagai dasar dari pembahasan pada bab-bab selanjutnya dalam tulisan disertasi ini.

B. Plastik dan cemaran MP secara global

Plastik saat ini merupakan salah satu material penting yang sangat dibutuhkan oleh manusia. Secara bahasa, plastik berasal dari kata "*plastikos*" yang memiliki arti sebagai "sesuatu yang bisa dicetak/dibentuk", akan tetapi berdasarkan aplikasinya sebutan plastik biasanya merujuk pada polimer sintetis (Crawford & Quinn 2017; Permono 2018). Secara global, plastik merupakan material yang paling banyak diproduksi dan digunakan di dunia setelah semen dan baja (Geyer et al. 2017). Hal ini dikarenakan plastik memiliki karakteristik-karakteristik unik seperti lentur, mudah dicetak dan awet (Rochman 2015). Sehingga sangat mudah diaplikasikan pada berbagai keperluan manusia, seperti pada bidang konstruksi, peralatan listrik, tekstil, dll. Plastik secara umum terdiri dari dua golongan utama, yaitu termoplastik dan termoset. Termoplastik merupakan jenis plastik yang jika dipanaskan, dia dapat kembali ke bentuk awalnya sehingga bisa didaur ulang beberapa kali, seperti PET, HDPE dan LDPE. Sedangkan termoset adalah tipe plastik yang apabila dipanaskan dia akan berubah ke dalam bentuk lain dan tidak dapat kembali ke bentuk awal, contoh dari termoset di antaranya adalah poliester resin. Dari penjabaran tersebut, maka diketahui bahwa kata plastik dapat merujuk pada material polimer dengan dimensi yang luas. Beberapa jenis plastik yang umum digunakan dapat dilihat pada tabel 2.

Walaupun plastik merupakan salah satu material yang banyak memberikan manfaat bagi manusia, akan tetapi saat ini diketahui bahwa material ini juga dapat memberikan dampak negatif kepada lingkungan apabila tidak dikelola dengan benar. Setelah pertama kali dikomersialkan pada tahun 1950-an, untuk pertama kalinya ditemukan adanya serpihan kecil sampah plastik di lingkungan laut, yaitu di Perairan Laut Sargasso pada tahun 1971 (Carpenter & Smith 1972). Diperkirakan keberadaan partikel kecil plastik tersebut berasal dari kegiatan buangan langsung dari lingkungan kota sekitar atau dari hasil buangan kapal-kapal yang melewati lokasi tersebut. Dalam laporan Carpenter & Smith (1972), ide mengenai dampak dari keberadaan partikel kecil plastik sudah mulai diprediksi, terkait dengan memungkinkannya partikel kecil plastik berfungsi sebagai vektor bakteri patogen dan juga dapat memberikan dampak buruk pada organisme akuatik akibat adanya kandungan *Polychlorinated bisphenyls* (PCB). Kemudian baru pada tahun 2000, pelaporan mengenai keberadaan partikel kecil plastik pada ikan mulai dilaporkan. Sebanyak 14% dari 69 individu ikan *Lampris immaculatus* di kepulauan Falkland, Atlantik, diketahui memiliki diet berupa potongan plastik kecil (Jackson et al. 2000). Pada tahun 2001 dilaporkan bahwa partikel plastik dengan ukuran kecil ditemukan di Perairan Samudera Pasifik dan diperkirakan memiliki dampak pada ikan, terutama yang bersifat *filter feeder* dan *planktivore*. Hal ini dikarenakan partikel plastik yang ditemukan pada saat itu, walaupun kelimpahannya masih lebih rendah

daripada plankton berdasarkan jumlahnya, akan tetapi berdasarkan bobot massa, MP di perairan tersebut lebih berat hingga 6 kali dari biomassa plankton (Moore et al. 2001).

Tabel 2. Beberapa contoh polimer plastik yang banyak digunakan

Nama Polimer Plastik	Singkatan	Penggunaan secara umum
<i>Polyethylene terephthalate</i>	PET	Kemasan makanan, benang, material <i>filler</i> , botol minuman
<i>High-density polyethylene</i>	HDPE	Wadah bahan kimia, ember, pipa, kemasan makanan, rak plastik
<i>Polyvinyl chloride</i>	PVC	Wadah, kotak listrik, pipa, rangka jendela, insulator listrik, alas kaki, karpet
<i>Low-density polyethylene</i>	LDPE	Tas, botol olahraga, karton, <i>furniture outdoor</i>
<i>Polypropylene</i>	PP	Tutup botol, isolasi, pipa, tali.
<i>Polystyrene</i>	PS	Pengemasan, insulator panas
<i>Polycarbonate</i>	PC	<i>Compact disc</i> , lensa lampu lalu lintas, perisai plastik, kacamata
<i>Polyamide (nylon)</i>	PA	Benang, senar
<i>Polyester</i>	PL	Tekstil
<i>Rayon</i>	-	Tekstil

Sumber : Crawford & Quinn 2017

Pada tahun 2004, untuk pertama kalinya istilah “mikroplastik” diperkenalkan oleh Thompson et al. dimana istilah MP merujuk pada partikel plastik kecil (<5 mm) yang banyak ditemukan di air dan sedimen laut (Thompson et al. 2004). Pelaporan oleh Thompson et al. ini kemudian mendapatkan atensi besar dari para peneliti terkait sifat dari MP yang dapat bersifat sebagai bahan cemaran yang bersifat fisik, kimia dan biologi secara bersamaan. Pada saat ini, pendefinisian dari kata “mikroplastik” terus dikembangkan, misalnya saja oleh Friash dan Nash (2019) yang mendefinisikan MP sebagai “segala bentuk partikel dan polimer sintesis, baik memiliki bentuk beraturan maupun tidak beraturan dengan ukuran berkisar antara 1 µm – 5 mm, baik yang bersifat primer atau sekunder berdasarkan sumbernya, dan tidak larut dalam air”. Hal ini dilakukan untuk lebih memberikan kriteria terhadap arti MP itu sendiri dan mempermudah peneliti-peneliti dunia untuk melakukan komparasi hasil penelitiannya.

Mikroplastik saat ini telah banyak ditemukan pada berbagai kompartemen lingkungan. Estimasi emisi MP dari daratan melalui sungai bahkan saat ini secara global sudah melebihi 45.000 ton/tahunnya dengan perkiraan bahwa sekitar 80% merupakan MP sekunder, dan 20% berasal dari MP primer. Jumlah tersebut tentu saja sangat besar, dan bisa terus meningkat dengan perkiraan dapat melebihi 70.000 ton pada tahun 2050

jika laju emisinya tidak berubah dengan saat ini. Di antara banyaknya region, diperkirakan bahwa region di Benua Asia, terkhusus Asia Pasifik, sebagai penyumbang MP terbanyak ke lingkungan laut (van Wijnen et al. 2019).

Selain pada kompartemen lingkungan, penelitian MP saat ini telah mulai mengkaji potensi dampak dari MP pada organisme, terutama pada organisme akuatik. Ketika dampak dari keberadaan makroplastik di perairan lebih mudah diketahui (*ghost fishing*, melilit organisme), dampak dari MP saat ini masih terus diteliti dan butuh pengembangan lebih jauh. Beberapa penelitian eksperimental menunjukkan bahwa MP dapat memberikan dampak berupa inflamasi, translokasi MP, gangguan sistem endokrin, gangguan metabolisme, penurunan sintasan, dan kerusakan jaringan pada organ (Rochman et al. 2014; Choi et al. 2018; Ding et al. 2018; Jabeen et al. 2018; Xiong et al. 2018). Beberapa penelitian lainnya, tidak menunjukkan adanya dampak dari keberadaan MP pada organisme (Jovanovi et al. 2018). Hasil penelitian yang bervariasi ini menunjukkan bahwa penelitian MP masih memiliki dimensi yang sangat luas, misalnya saja terkait dengan karakteristik dari MP itu sendiri seperti, kelimpahan, bentuk, jenis polimer dan bahan aditif dari MP yang diujikan secara eksperimental (Rochman 2020). Hal ini menunjukkan bahwa kajian mengenai pencemaran MP, terutama di bidang pencemaran perairan masih memiliki banyak *gaps*/celah untuk dapat memberikan gambaran umum mengenai dampak MP dan langkah-langkah pengurangan serta pengelolaannya.

C. Perkembangan penelitian MP di Indonesia

Penelitian mengenai pencemaran MP di Indonesia saat ini juga sudah mulai dilakukan. Kebanyakan penelitian mengenai MP, baru dilaksanakan setidaknya semenjak tahun 2014 (Purba et al. 2019). Padahal potensi pencemaran MP di Indonesia sangat tinggi, terkait dengan lemahnya sistem pengelolaan sampah padat di Indonesia (Lestari & Trihadiningrum 2019). Indonesia dengan statusnya sebagai negara berkembang, dapat memproduksi sampah padat hingga 36,5 juta ton/tahun, dengan 17% nya, atau sekitar 6 juta ton adalah sampah plastik (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2021). Dengan produksi sampah plastik yang tinggi, diperkirakan sekitar 0,48 – 1,29 juta ton sampah plastik masuk ke lingkungan laut per tahunnya (Jambeck et al. 2015). Dengan tingginya potensi buangan sampah plastik di Indonesia, hal ini sejalan dengan peningkatan keberadaan MP di lingkungan akibat dari fragmentasi sampah plastik dengan ukuran yang lebih besar (Lestari & Trihadiningrum 2019; van Wijnen et al. 2019). Kemudian, Indonesia merupakan negara yang terletak di jalur Arlindo, di mana pada lokasi ini, sampah plastik dari Samudera Pasifik dapat terbawa bersama massa air

laut dan masuk ke Perairan Laut Indonesia (Purba et al. 2019; Tahir, Samawi, et al. 2019).

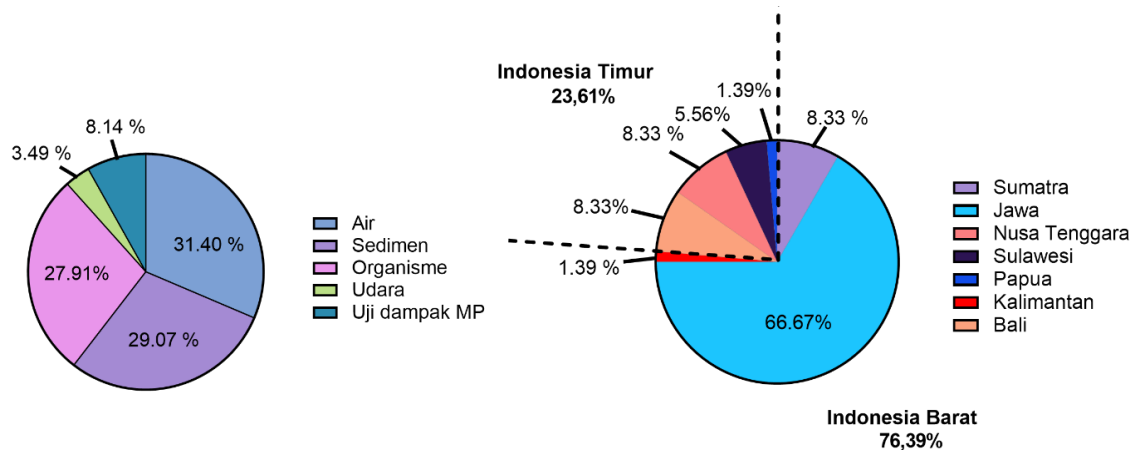
Penelitian mengenai keberadaan MP di Indonesia dimulai setidaknya pada tahun 2014 di mana pertama kali MP dilaporkan berada pada saluran cerna ikan teri yang didaratkan di Tempat Pelelangan Ikan Paotere, Makassar. Kemudian penelitian pada tahun 2015 melaporkan bahwa 55% dari 11 spesies ikan yang dikumpulkan di lokasi Pelelangan Ikan Paotere, Kota Makassar juga telah mengonsumsi MP. Semenjak saat itu, penelitian mengenai MP di Indonesia mendapatkan banyak perhatian dari para peneliti dan akademisi. Kemudian penelitian mengenai identifikasi dan kuantifikasi MP di kompartemen lingkungan mulai dilakukan di Indonesia seperti pada kompartemen air (Syakti et al. 2017; Cordova et al. 2019; Lestari et al. 2020), sedimen (Manalu et al. 2017; Firdaus et al. 2020) dan biota (Hastuti et al. 2019; Tahir, Samawi, et al. 2019; Tahir et al. 2020).

Hingga Agustus 2020, setidaknya sudah terdapat 72 penelitian terkait dengan MP di Indonesia (Alam & Rachmawati 2020). Dari sekian banyak penelitian tersebut, apabila dipetakan berdasarkan objek penelitiannya, Penelitian MP yang dilakukan di Indonesia saat ini masih banyak berfokus pada distribusi MP yang ada pada kompartemen lingkungan (gambar 1). penelitian distribusi MP di air, sedimen dan biota masih mendominasi berdasarkan jumlahnya dibandingkan dengan penelitian mengenai MP di kompartemen udara dan juga uji dampak keberadaan MP. Padahal penelitian mengenai uji dampak dari keberadaan MP terhadap organisme juga sangat penting. Penelitian ini dapat memberikan informasi mengenai tingkat bahaya serta mekanisme kerusakan akibat MP pada organisme. Indonesia sebagai negara maritim yang banyak berfokus pada bidang perikanan, baik hasil laut maupun perairan umum, penting untuk mengetahui dampak dari MP terhadap organisme akuatik, terutama pada spesies penting yang umum dimanfaatkan.

Kemudian berdasarkan lokasi studinya, penelitian MP masih hanya terfokus di bagian Barat Indonesia, dengan 76,39 % penelitian MP yang dilakukan di Indonesia masih hanya berfokus pada Pulau Jawa, Kalimantan dan Sumatera. Sedangkan studi MP di Timur Indonesia masih sangat sedikit, hanya sekitar 23,61% (Gambar 1). Hal ini menjadikan masih sedikitnya data mengenai pencemaran MP di bagian Timur Indonesia. Padahal Kawasan perairan di Timur Indonesia merupakan perairan yang dilalui Arlindo yang berpotensi membawa cemaran MP dari timur Indonesia ke area yang lebih luas.

Jika ditinjau berdasarkan jenis ekosistemnya, penelitian MP di Indonesia masih berfokus pada lingkungan laut (Lestari & Trihadiningrum 2019; Purba et al. 2019). Padahal selain lingkungan laut, Indonesia juga memiliki sumber daya perikanan dari perairan umum yang cukup tinggi, mencapai lebih dari 450.000 ton (Kementerian

Kelautan dan Perikanan 2018). Sehingga kajian mengenai cemaran MP ini pada lokasi ekosistem perairan umum di Indonesia harus lebih banyak dilakukan. Salah satunya adalah pada lokasi sungai.



Gambar 1. Proporsi penelitian MP yang telah dilaksanakan di Indonesia berdasarkan Objek kajian (kiri, n=86) dan Lokasi kajian (kanan, n=72). Sumber: Alam & Rachmawati (2020), diolah

Hingga tahun 2020, setidaknya baru ada 8 penelitian MP yang berfokus pada lingkungan sungai di Indonesia (Tabel 3). Nilai kelimpahan MP di beberapa lokasi di Pulau Jawa, seperti yang ada pada Sungai Ciwalengke dan Sungai Cimandiri menunjukkan kelimpahan yang cukup tinggi, hingga lebih dari 5.000 MP/m³. Sedangkan beberapa penelitian lainnya seperti di Sungai Citarum dan Surabaya, menunjukkan kelimpahan MP yang jauh lebih rendah yang hanya berkisar 0,06 – 1,84 MP/m³. Sementara pada kompartemen sedimen variasi dari kelimpahan MP tidak terlalu tinggi, hanya berkisar antara 30,3 – 166,6 MP/kg. Di antara 8 penelitian yang sudah dilakukan, hanya ada 3 penelitian yang sudah membuktikan *intake* plastik oleh ikan sungai sebagai organisme akuatik konsumsi.

Berdasarkan Tabel 3. terlihat bahwa penelitian MP di lingkungan Sungai Indonesia masih memberikan celah yang sangat besar untuk dikaji. Hal ini terutama terkait dengan penelitian mengenai kelimpahan dan dampak dari MP terhadap organisme akuatik. Saat ini, penelitian keberadaan MP pada spesies ikan-ikan sungai juga masih sangat sedikit dilakukan, sementara penelitian serupa pada ekosistem laut di Indonesia sudah banyak dilakukan dan berkembang (Tahir & Rochman 2014; Hastuti et al. 2019; Tahir et al. 2020). Kemudian lebih jauh lagi, selain kelimpahan MP pada ikan sungai, dampak MP tersebut kepada organisme akuatik juga masih perlu dilakukan. Sehingga dalam praktiknya, dalam melakukan pengkajian pencemaran MP di lingkungan sungai, parameter mengenai kelimpahan MP pada lingkungan (air dan sedimen) dan juga organisme akuatik (ikan, kerang, dll) menjadi penting dilakukan. Penelitian tersebut dapat digunakan sebagai dasar dari studi mengenai prakiraan

dampak dari cemaran tersebut pada organisme, terutama pada komoditas konsumsi penting.

Tabel 3. Penelitian MP di lingkungan sungai di Indonesia. (-hingga tahun 2020)

no	Lokasi	Kelimpahan Mikroplastik			referensi
		Air (MP/m ³)	Sedimen (MP/kg)	Biota (MP/individu)	
1	Sungai Ciwalengke, Bandung	5.850 ± 3.280	30,3 ± 15,9	-	(Alam et al. 2019)
2	Sungai Surabaya, Surabaya	1,147 – 13,33	-	-	(Wijaya & Trihadiningrum 2019)
3	Sungai Surabaya, Surabaya	1,22 – 21,16	-	-	(Lestari et al. 2020)
4	Sungai Surabaya, Surabaya	-	92 - 590	-	(Firdaus et al. 2020)
5	Sungai Citarum, Bekasi	0,0574 ± 0,025	166,6 ± 5,7	1,11 – 2,66 (<i>Chanos chanos</i>)	(Sembiring et al. 2020)
6	Sungai Cimandiri, Sukabumi	685 – 7.444	-	-	(Pe et al. 2020)
7	Sungai Tallo, Makassar	-	-	2,47 ± 1,68 (<i>Oreochromis mossambicus</i>)	(Bahri et al. 2020)
8	Sungai Tallo dan Jeneberang, Makassar. (Studi pendahuluan penelitian ini)	1,84 – 1,78	-	0,9 – 3,5 (Beberapa jenis ikan pelagis konsumsi)	(Wicaksono et al. 2020)

D. Kota Makassar Sebagai Lokasi Studi Pencemaran MP

Kota Makassar merupakan salah satu kota besar di bagian Indonesia Timur. Kota ini merupakan Ibu Kota Provinsi Sulawesi Selatan dengan jumlah penduduk sekitar 1,5 Juta jiwa dengan laju pertumbuhan penduduk sebesar 1,23% per tahunnya (BPS Kota Makassar 2020). Dengan padatnya penduduk di kota Makassar, maka potensi cemaran antropogenik menjadi sangat tinggi, di antaranya adalah cemaran bahan organik, logam berat dan sampah padat (Najamuddin et al. 2016; Thamrin et al. 2018; Shuker & Cadman 2018; Werorilangi et al. 2019). Dalam sehari, Kota Makassar dapat menghasilkan sekitar 1425 ton sampah padat, dengan 16,29% adalah sampah plastik (Tabel 4). Dengan jumlah produksi sampah padat yang cukup besar, sampah padat yang tidak terkelola di Kota Makassar dapat mencapai 425 ton/hari (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan 2019). Keberadaan sampah yang tidak terkelola ini dapat berakhir di kanal dan sungai yang ada di Kota Makassar. Berdasarkan studi *World Bank* pada tahun 2018, diketahui bahwa Kota Makassar memiliki proporsi sampah plastik paling tinggi pada saluran air dibandingkan dengan kota-kota lain di Indonesia, yang dapat mencapai

44,7% (Shuker & Cadman 2018). Pada laporan yang sama juga dikatakan bahwa lokasi hilir dari Sungai Tallo merupakan salah satu *hotspot* sampah plastik di Kota Makassar.

Tabel 4. Perbandingan produksi dan fasilitas pengelolaan sampah padat di Kota Makassar, dan 4 kota besar lainnya di Indonesia

Kota	Estimasi sampah padat (Ton/hari)	Proporsi sampah plastik (%)	Infrastruktur pengolah sampah padat				
			Petugas (Orang)	Truk pengangkut (Unit)	Gerobak pengangkut (Unit)	TPS (Unit)	Peralatan berat (Unit)
Makassar	1.425	16,29	200	125	983	36	273
Jakarta	7.164,53	12,40	10.414	1.692	1.447	1.099	2.064
Surabaya	2.790,89	19,44	1.822	173	630	183	73
Medan	1.874	15,27	3.013	18	276	876	57
Pontianak	300	5,57	730	45	80	112	53

Sumber : Shuker & Cadman 2018; Lestari & Trihadiningrum 2019

Dengan tingginya *input* sampah plastik di kanal dan sungai di Kota Makassar, pencemaran MP juga berpotensi menjadi salah satu masalah di Kota Makassar. Perairan pesisir di Kota Makassar diketahui telah tercemar oleh MP dengan berbagai bentuk dan warna. Mikroplastik dengan warna biru diketahui sebagai warna yang sangat dominan ditemukan pada pesisir Kota Makassar, hingga mencapai 58% dari keseluruhan MP yang dikoleksi di perairan pesisir Makassar (Afdal et al. 2019). Cemar MP ini juga sudah ditemukan pada kepulauan di lepas pantai Kota Makassar, dan juga telah terakumulasi pada ikan dan hewan bentos di lokasi tersebut (Rochman et al. 2015; Tahir et al. 2020).

Sejauh ini, studi MP di lingkungan Sungai Kota Makassar masih belum banyak dilakukan. Penelitian pada tahun 2020, menunjukkan bahwa ikan mujair (*Oreochromis Mossambicus*) dari Sungai Tallo telah mengingesti MP dengan rata-rata kelimpahan $2,47 \pm 1,68$ MP/individu (Bahri et al. 2020). Hal ini menunjukkan terdapat Indikasi bahwa MP memang telah terakumulasi pada organisme akuatik sungai. Keberadaan MP pada ikan sungai dapat memberikan potensi bahaya tersendiri, apalagi ikan mujair merupakan ikan yang umum dikonsumsi oleh masyarakat. Untuk memberikan gambaran awal mengenai kondisi pencemaran MP di Sungai-sungai Kota Makassar, maka dilakukanlah uji pendahuluan kelimpahan MP di air dan ikan pelagis hasil tangkapan di lokasi Muara Sungai Tallo dan Sungai Jeneberang (Tabel 2). Hasil penelitian pendahuluan menunjukkan bahwa air yang berasal dari sungai pada kedua muara tersebut telah terdapat MP yang kelimpahannya berkisar antara 2,2 – 2,4 MP/m³, lebih tinggi dari lokasi yang lebih dekat dengan laut. Hal ini mengindikasikan bahwa salah satu sumber utama

cemaran MP yang ada di kedua muara tersebut diperkirakan berasal dari wilayah sungai. Ikan pelagis hasil tangkapan dari lokasi muara sungai tersebut, yang terdiri dari spesies *Oreochromis niloticus*, *Megalops cyprinoides* dan *Barbonymus gonionotus* juga telah mengingesti MP hingga 3,5 MP/individu, dengan tingkat kontaminasi berkisar antara 47,83 – 100 % per spesiesnya (Wicaksono et al. 2020).

Hasil penelitian pendahuluan menunjukkan bahwa Sungai-sungai di Kota Makassar diduga kuat sebagai sumber pencemaran MP di perairan pesisir Kota Makassar. Akan tetapi masih banyak informasi yang tidak diketahui terkait pencemaran MP di lokasi ini, hal ini terkait dengan bentuk tren spasial dan temporal kelimpahan MP yang ada di lingkungan Sungai, kemudian gambaran umum ingesti MP oleh organisme akuatik dan dampak dari MP ini terhadap ikan sebagai organisme akuatik yang paling sering dimanfaatkan dari lokasi sungai. Sehingga masih dibutuhkan penelitian untuk memberikan gambaran umum pencemaran MP di Sungai-sungai yang berada di Kota Makassar.

E. Rumusan Masalah, Tujuan Penelitian, Hipotesis, dan Novelty Penelitian

1. Kerangka pikir dan rumusan masalah

Kegiatan domestik dan perkotaan yang berada di Kota Makassar pada akhirnya akan memberikan bahan buangan berupa sampah plastik termasuk MP, yang belum terkelola dengan baik. Sumber sampah plastik tersebut kemudian dapat terbagi ke dalam MP primer yang berasal dari hasil samping kosmetik, serat sisa pakaian, cat, serpihan ban dan debu perkotaan (Boucher dan Friot, 2017) dan juga berupa sampah plastik makro yang pada kondisi tertentu dapat terpecah menjadi sampah plastik yang lebih kecil sebagai MP sekunder (Corcoran et al. 2009). Keberadaan sampah tersebut kemudian terbawa melalui mekanisme air limpasan dari daratan menuju ke aliran sungai (Dris et al, 2015).

Mikroplastik yang terbawa ke sungai kemudian akan terdistribusi berdasarkan nasib/*fate* MP di perairan, di mana jenis polimer MP dengan densitas tinggi ($> 1 \text{ g/cm}^3$) secara umum akan tenggelam di dalam air dan terendap ke sedimen. Sedangkan jenis polimer MP densitas jenis lebih rendah ($< 1 \text{ g/cm}^3$) akan memiliki kecenderungan untuk terapung pada air permukaan. Densitas dari MP itu sangat ditentukan oleh jenis polimernya (Crawford & Quinn 2017). Keberadaan MP pada lingkungan sungai tersebut pada beberapa kondisi juga dapat berinteraksi dengan organisme akuatik di dalamnya. Bentuk MP yang menyerupai makanan alami dari ikan kemudian menjadikannya dapat dikonsumsi oleh ikan yang ada pada lingkungan tersebut (Cole et al. 2011; Dris et al. 2015). Perbedaan *trophic fraction* pada ikan juga diduga kuat sebagai salah satu faktor bagaimana suatu spesies ikan dapat mengakumulasi partikel MP pada lingkungan

(McNeish et al. 2018). Berdasarkan pemaparan tersebut, maka nasib dari MP yang ada pada lingkungan sungai akan terdistribusi pada setidaknya tiga kompartemen berbeda, yaitu pada sedimen, air dan organisme akuatik.

Mikroplastik kemudian dapat masuk ke dalam jejaring makanan dan terakumulasi pada hampir setiap tingkatan trofik pada organisme yang berada di lingkungan perairan. Keberadaan MP sendiri pada dasarnya dapat mengganggu kondisi fisiologis yang ada pada hewan akuatik akibat keberadaan secara fisik dan kimia, termasuk adanya *plasticizer* dan juga polutan lain yang teradsorpsi pada MP (Rochman 2015). Gangguan yang dialami oleh organisme akibat MP dapat terlihat dari beberapa parameter seperti histologi dan imun (Rochman et al. 2013, 2014; Rochman 2015). Beberapa dari hewan akuatik tersebut kemudian dapat juga merupakan hewan yang menjadi komoditas konsumsi oleh manusia yang berada di sekitar ekosistem tersebut. Dengan keberadaan MP pada ikan kemudian akan memberikan potensi ancaman kesehatan bagi manusia yang memanfaatkan ikan tersebut sebagai komoditas pangan konsumsi (Thompson et al. 2009; Santillo et al. 2017).

Sungai Jeneberang dan Sungai Tallo merupakan sungai yang terletak di Kota Makassar yang merupakan kota dengan populasi penduduk yang tinggi, mencapai 1,5 Juta Jiwa. Keberadaan partikel MP pada lingkungan perairan tawar diketahui sangat berhubungan dengan kegiatan antropogenik yang ada pada sekitar lokasi perairan tersebut (Kataoka et al. 2019). Dengan keberadaan potensi sumber pencemar MP yang besar, hingga saat ini lokasi perairan sungai di Kota Makassar belum pernah diketahui profil pencemaran MP-nya. Padahal sungai tersebut juga merupakan lokasi-lokasi yang dimanfaatkan sebagai tempat penangkapan dan budidaya ikan. Dengan keberadaan *gap* pengetahuan mengenai cemaran MP tersebut, maka dibuatlah beberapa rumusan masalah/pertanyaan penelitian sebagai berikut:

1. Bagaimana tren kelimpahan dan profil pencemaran MP pada kompartemen lingkungan (air dan sedimen) di Sungai Tallo dan Jeneberang?
2. Apakah Pencemaran MP pada lingkungan Tallo dan Jeneberang dapat ter-*uptake* dan berpindah pada organisme akuatik di Sungai Tallo dan Jeneberang?
3. Apakah keberadaan MP dapat memberikan dampak pada spesies ikan yang biasa dimanfaatkan pada lokasi sungai?

2. Tujuan penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang ada, maka dibuatlah tujuan umum penelitian sebagai berikut:

1. Mengevaluasi tren spasial dan temporal MP pada lingkungan perairan Sungai Tallo dan Jeneberang.
2. Mengevaluasi status pencemaran MP pada organisme perairan yang umum dimanfaatkan di Sungai Tallo dan Jeneberang.
3. Mengevaluasi dampak dari keberadaan MP pada spesies ikan yang umum dimanfaatkan di Sungai Tallo dan Jeneberang berdasarkan parameter sederhana, meliputi profil sel darah putih dan gambaran histopatologi.

3. Novelty Penelitian

Kebaruan dalam penelitian ini meliputi beberapa poin berikut:

1. Status terkini pencemaran MP di lingkungan sungai Kota Makassar dengan melakukan pendekatan tren spasial dan temporal pada dua sungai dengan karakteristik aliran sungai yang berbeda
2. Evaluasi cemaran MP pada organisme sungai dengan penekanan pada kebiasaan makan organisme yang berbeda di perairan
3. Penggunaan gambaran histopatologi dalam penilaian dampak MP pada spesies ikan yang umum dimanfaatkan di lingkungan sungai.

Ketiga poin tersebut dilakukan secara bertahap pada lingkungan sungai Kota Makassar, sehingga dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif pada kondisi pencemaran MP pada lingkungan sungai di Kota Makassar yang mana informasi terkait dengan profil pencemaran MP masih belum tersedia.

F. Kerangka Disertasi

Penelitian ini akan dituliskan dalam suatu karya disertasi yang terdiri dari 5 bab. Setiap bab akan disajikan secara berurut untuk memberikan gambaran utuh dari penelitian. Susunan bab dalam disertasi ini akan mengikuti *outline* disertasi sebagai berikut :

Bab 1. Bab ini akan berisi pendahuluan umum, di mana bab ini akan memberikan gambaran utuh mengenai latar belakang, rumusan masalah dan juga tujuan umum dan kebaruan penelitian. Pada bab ini juga akan diberikan gambaran mengenai penelitian MP dan perkembangannya secara global dan nasional. Gambaran mengenai *gap/celah* penelitian MP juga diulas pada bagian ini.

Bab 2. Bab ini akan membahas mengenai gambaran umum tren, profil dan nasib MP pada kompartemen air dan sedimen. Bab ini memberikan gambaran mengenai perbedaan tren spasial dari Sungai Jeneberang dan Sungai Tallo. Kemudian perbedaan profil MP antara musim hujan dan kemarau juga akan digambarkan pada bab ini. Secara

umum bab ini akan dikhususkan untuk menyelesaikan tujuan pertama pada penelitian ini.

Bab 3. Bab ini akan membahas mengenai bagaimana kondisi pencemaran MP pada organisme perairan di Sungai Tallo dan Jeneberang. Beberapa faktor utama seperti kebiasaan makan juga akan dibahas terhadap pengaruhnya pada ingesti MP oleh organisme di lingkungan sungai. Secara umum bab ini akan dikhususkan untuk menyelesaikan tujuan kedua pada penelitian ini.

Bab 4. Bab ini akan membahas mengenai bagaimana pengaruh MP terhadap ikan konsumsi yang umum ditemukan di lingkungan sungai secara eksperimental. Penelitian ini akan melihat dampak secara umum melalui beberapa parameter seperti pertumbuhan, profil darah dan gambaran jaringan pada organ (histopatologi). Secara umum bab ini akan dikhususkan untuk menyelesaikan tujuan ketiga pada penelitian ini.

Bab 5. Bab ini akan berisi pembahasan umum, pada bagian ini hasil dan pembahasan dari bab-bab sebelumnya akan dirangkai dan dikaitkan untuk memberikan suatu kesimpulan umum. Secara umum bab ini akan dikhususkan untuk merangkai ketiga tujuan penelitian untuk menjadi suatu kesimpulan dan rekomendasi.

Bab 6. Bab ini berisi kesimpulan umum dan rekomendasi, pada bab ini akan dituliskan secara ringkas kesimpulan dari keseluruhan karya tulis disertasi ini disertai saran dan/atau rekomendasi umum dari penelitian ini.

Diharapkan keseluruhan rangkaian penyusunan disertasi ini akan memberikan gambaran jelas pada studi mengenai MP pada Sungai-sungai besar di Kota Makassar.

II. Profil Pencemaran Mikroplastik pada Air dan Sedimen di Sungai-sungai Kota Makassar

Abstrak

Sungai merupakan salah satu jalur utama masuknya polutan mikroplastik (MP) ke lingkungan laut. Kota Makassar, merupakan salah satu lokasi yang dicurigai sebagai sumber dari cemaran MP. Sungai Tallo dan Jeneberang, sungai-sungai utama yang ada di Kota Makassar, memiliki perbedaan karakteristik sepanjang alirannya yang mungkin dapat memberikan perbedaan karakteristik pencemaran MP. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi profil pencemaran MP di Sungai Tallo dan Jeneberang, yang terkait dengan tren spasial, variasi terhadap musim, serta karakteristik (warna, bentuk dan ukuran) MP yang ada di kedua sungai tersebut. Sebanyak 72 sampel air dan 72 sampel sedimen diambil pada kedua sungai pada musim hujan dan kemarau. Pengambilan sampel air dilakukan dengan jaring *neuston* dan pengambilan sampel sedimen dilakukan dengan menggunakan sedimen *corer*, yang kemudian diikuti oleh pemisahan densitas. Semua sampel air dan sedimen yang diambil terkontaminasi oleh MP dengan kisaran kelimpahan $0,6 \pm 0,1 - 3,4 \pm 0,1$ MP/m³ pada sampel air dan $16,7 \pm 12,0 - 150 \pm 20,8$ MP/kg pada sampel sedimen. Mikroplastik dengan bentuk *line* dan *fragment* merupakan bentuk MP paling dominan ditemukan pada sampel. Sedangkan dari segi warna, MP biru dan transparan yang paling banyak ditemukan. Mikroplastik yang ditemukan pada kedua sungai didominasi oleh jenis polimer polietilena. Kelimpahan MP pada kedua sungai cenderung lebih tinggi di musim kemarau. Kemudian, tren spasial kelimpahan MP juga berbeda antara kedua sungai. Upaya untuk mencegah pencemaran MP pada sungai-sungai di Kota Makassar harus dilakukan sebelum pencemaran MP menjadi lebih parah di masa depan.

A. Pendahuluan

Sungai saat ini diketahui sebagai salah satu sumber utama masuknya cemaran MP ke lingkungan laut. Lebih dari 80% *input* MP primer di laut bahkan berasal dari lingkungan sungai (Boucher & Friot 2017). Beberapa sungai besar secara global juga menunjukkan kelimpahan MP yang tinggi, misalnya saja di Sungai Rhine, sungai terbesar di Benua Eropa, dilaporkan memiliki konsentrasi MP pada air mencapai lebih dari 800.000 MP/km² (Mani et al. 2016). Sungai di dataran Tibet, China, juga dilaporkan memiliki kelimpahan MP dengan kisaran 400-950 MP/m³ (Jiang et al. 2019). Sungai Nakdong di Korea Selatan juga dilaporkan melepaskan setidaknya 53 ton MP per tahun ke lingkungan laut, dengan kelimpahan setara 5 miliar potong MP (Eo et al. 2019). Berbagai penelitian yang disebutkan di atas, merujuk pada kesimpulan serupa, di mana

keberadaan MP yang ada di lingkungan sungai sangat terkait dengan kegiatan antropogenik di lingkungan sekitar sungai tersebut, seperti keberadaan pemukiman, pengolahan air limbah dan pertanian.

Informasi mengenai keberadaan MP pada air dan sedimen sungai merupakan hal dasar pada pendugaan pencemaran MP di lingkungan sungai. Hal ini terkait *fate* dari MP di lingkungan akuatik, di mana sebelum terakumulasi dan menimbulkan dampak pada organisme akuatik dan ekosistem, pada dasarnya MP terlebih dahulu terdistribusi pada habitat organisme tersebut (McNeish et al. 2018). Mikroplastik yang dihasilkan dari kegiatan manusia, biasanya akan masuk ke dalam lingkungan akuatik melalui berbagai mekanisme (air limpasan, udara, buangan langsung, dll) dan akhirnya terdistribusi pada lingkungan sungai (Dris et al. 2015; Wright et al. 2020). Mikroplastik dengan massa jenis yang tinggi biasanya akan tenggelam dan terdistribusi ke dalam kompartemen sedimen, sehingga MP jenis ini sangat terkait dengan kelimpahan MP pada sedimen sungai. Sedangkan pada MP dengan jenis polimer bermassa jenis rendah, akan terapung dan terakumulasi pada permukaan air sungai, dan terkait dengan nilai kelimpahan MP pada air. Keberadaan MP pada kedua kompartemen ini kemudian dapat tersedia secara biologis bagi organisme di habitat sungai dan dapat memberikan dampak negatif akibat dari keberadaan zat toksik yang ada pada MP tersebut (Rochman 2015; Andrady 2017).

Kota Makassar merupakan Kota dengan penduduk mencapai 1,5 juta jiwa. Kota ini dilewati oleh dua sungai besar, yaitu Sungai Tallo yang berada di Utara Pusat Kota dan Sungai Jeneberang yang berlokasi di Selatan Pusat Kota. Akan tetapi, hingga saat ini profil pencemaran MP pada kedua sungai ini masih belum diketahui. Padahal, kedua sungai ini masih dimanfaatkan oleh masyarakat sebagai lokasi kegiatan penangkapan dan budidaya ikan. Sungai Tallo dan Jeneberang sendiri merupakan lokasi studi yang menarik, mengingat kedua sungai ini memiliki karakteristik aliran yang cukup berbeda. Sungai Tallo memiliki karakteristik berupa tepi sungai yang masih alami yang dicirikan oleh masih banyaknya ekosistem bakau pada lokasi ini. Kepadatan bakau yang ada di tepi Sungai Tallo dapat mencapai setidaknya 6.300 individu/ha yang terdiri dari spesies *Nypa fruticans*, *Avicennia alba* dan *Rhizophora mucronata* (Rahman et al. 2018). Sebaliknya, Sungai Jeneberang cenderung memiliki tepian yang sudah dikonstruksi untuk mencegah erosi pada tepi sungai. Selain itu, terdapat beberapa bendungan dibangun sepanjang aliran Sungai Jeneberang (Bendungan Bili-bili, Kampili, dan Karet).

Secara umum, perbedaan Sungai Tallo dan Jeneberang adalah terkait dengan keberadaan intervensi manusia pada alirannya. Sungai Tallo cenderung masih berada pada kondisi yang alami, sementara Sungai Jeneberang sudah dikonstruksi dan tidak berada pada kondisi alaminya. Perbedaan karakteristik kedua sungai tersebut mungkin saja dapat memberikan perbedaan pada profil pencemaran MP yang ada pada kedua

sungai tersebut. Bab ini akan memberikan gambaran mengenai tren pencemaran MP yang ada pada kompartemen lingkungan (air dan sedimen) di Sungai Tallo dan Jeneberang. Untuk memberikan gambaran tersebut, maka tujuan penelitian pada bab ini akan meliputi (1) mengevaluasi tren kelimpahan MP di Sungai Tallo dan Jeneberang secara spasial dan temporal, (2) menganalisis profil warna, bentuk dan ukuran MP pada kompartemen sedimen dan air di kedua sungai dan (3) mengidentifikasi jenis polimer dari beberapa representatif MP yang ditemukan di Sungai Tallo dan Jeneberang. Hal-hal tersebut merupakan informasi awal untuk memprakirakan tingkat cemaran MP yang terjadi di kedua sungai tersebut.

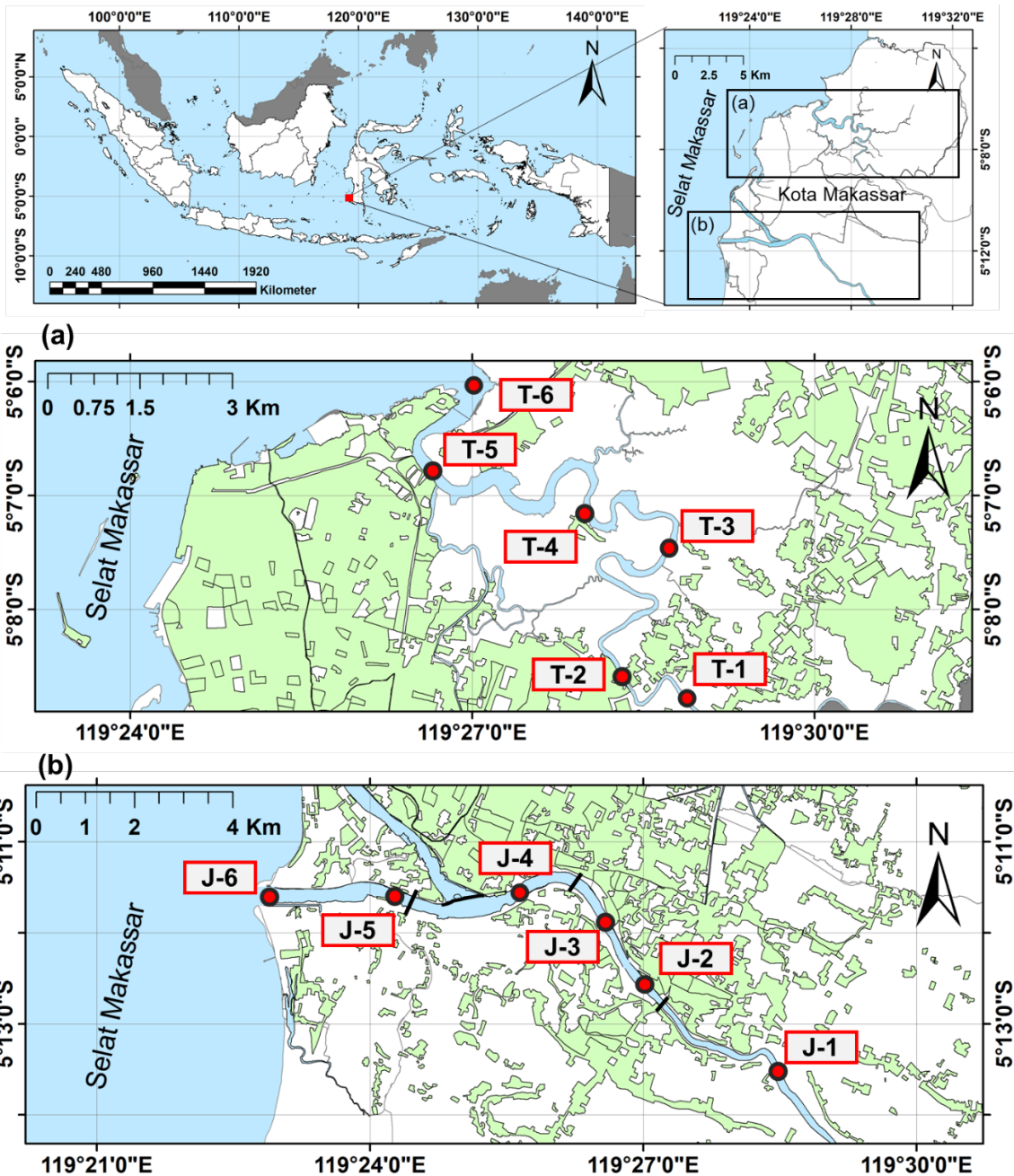
B. Metode Penelitian

1. Lokasi Studi

Pengambilan sampel dilakukan di Sungai Tallo dan Jeneberang yang berbatasan dengan Kota Makassar, dan terkhusus pada Sungai Jeneberang juga berbatasan dengan Kabupaten Gowa. Hal ini dikarenakan di Sungai Jeneberang, selain mendapatkan *input* air dari Kota Makassar, sebagian besar Daerah Aliran Sungai (DAS) juga berada di Kabupaten Gowa. Sampel diambil pada bulan Maret 2019 untuk merepresentasikan musim hujan dan bulan Agustus 2019 untuk merepresentasikan musim kemarau (Lampiran 1). Sebanyak 6 titik pengambilan sampel pada setiap sungai dipilih secara *purposive* dengan mempertimbangkan potensi sumber pencemaran di sekitar lokasi pengambilan sampel. Titik 1 pada kedua sungai mewakili lokasi paling hulu, pada lokasi ini aliran sungai mulai masuk ke dalam lingkungan perkotaan. Titik 2-4 pada sungai Tallo merupakan kawasan kota Makassar yang dikelilingi oleh ekosistem bakau. Berdasarkan rencana tata ruang wilayah Kota Makassar, lokasi sungai Tallo memang dikhususkan sebagai kawasan lindung. Di titik 2 Sungai Tallo, walaupun masih dikelilingi oleh bakau, pada lokasi ini terdapat jembatan dan lokasinya berdekatan dengan pusat perniagaan Kecamatan Tamalanrea, yang diduga juga dapat memberikan peluang sumber cemaran MP. Terdapat aliran air yang berasal dari Kawasan Industri Makassar (KIMA) di antara titik 3 dan 4 Sungai Tallo. Titik 5 dan 6 di Sungai Tallo merupakan bagian muara sungai, yang mana pada lokasi ini terdapat pemukiman penduduk, dan terdapat aliran masuk dari kanal pampang tepat di titik 5.

Sementara itu, Titik 2-4 di Sungai Jeneberang merupakan lokasi yang berbatasan langsung dengan pemukiman padat penduduk Kab. Gowa dan Kota Makassar. Sedangkan titik 5 dan 6 merupakan kawasan muara sungai yang kawasan sekitarnya cenderung didominasi oleh persawahan. Terdapat 3 bendungan di Sungai Jeneberang yang terletak di antara titik 1 dan 2, 3 dan 4, serta 4 dan 5. Gambaran umum

titik pengambilan sampel pada kedua sungai dapat dilihat pada Gambar 2 dan Lampiran 2.

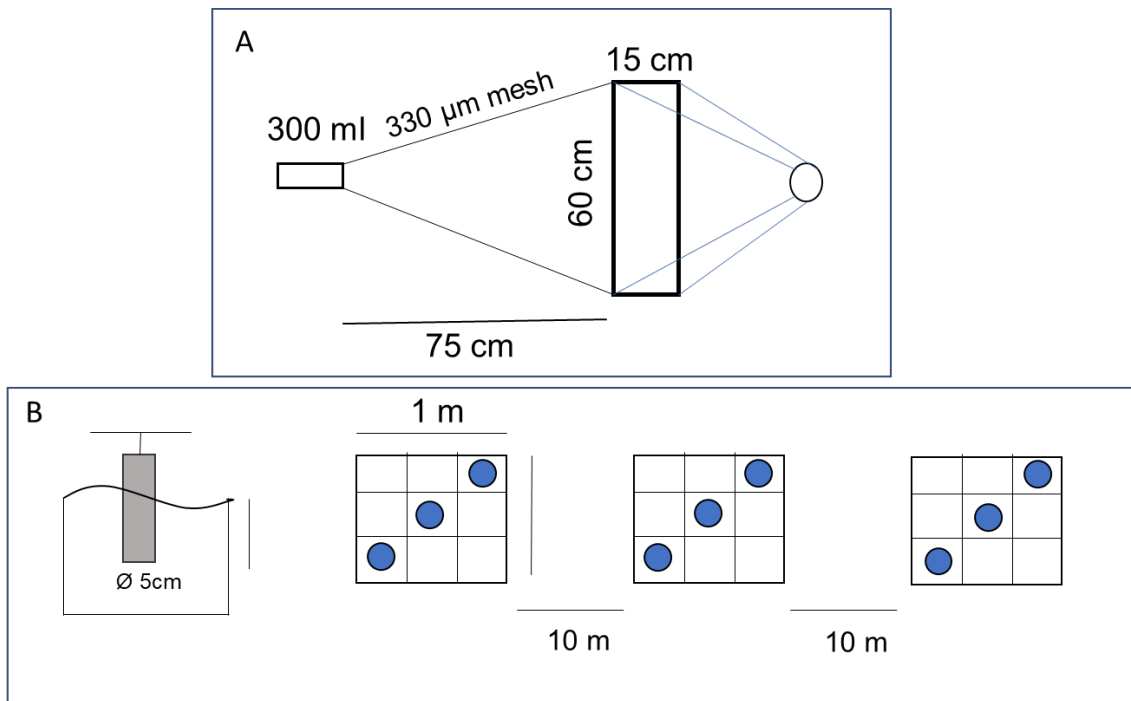


Gambar 2. Titik Pengambilan sampel air dan sedimen di Sungai Tallo (a) dan Sungai Jeneberang (b). area berwarna hijau menunjukkan lokasi pemukiman penduduk Kota Makassar dan Kab. Gowa (BIG, 2019)

2. Metode pengambilan sampel

Sampel air diambil sebanyak tiga ulangan pada setiap titik pengambilan sampel dengan menggunakan jaring *neuston* (Hidalgo-Ruz 2012; Syakti et al. 2017). Jaring *neuston* yang digunakan pada penelitian ini memiliki dimensi ukuran jaring 75 cm x 60 cm x 15 cm (P×L×T) dengan bukaan mulut jaring berbentuk persegi panjang, ukuran mata jaring 330 μ m dan memiliki *cod-end* dengan volume 300 mL (Gambar 3.A). Jaring

neuston ditarik tegak lurus dengan arah arus sungai pada kecepatan rata-rata 4 km/jam dan jarak tariknya diukur dengan menggunakan GPS (Garmin Montana 680 map). Air yang terkumpul pada *cod-end* kemudian diambil dan dimasukkan ke dalam botol sampel dan ditambahkan 30 mL larutan KOH 10% (Tahir et al. 2019). Sampel kemudian dibawa ke laboratorium Ekotoksikologi Laut, Fakultas Ilmu Kelautan dan Perikanan, Universitas Hasanuddin.



Gambar 3. Sketsa dimensi jaring *neuston* (A), sedimen *corer* dan transek (B) yang digunakan pada penelitian ini

Di laboratorium, sampel disimpan pada lemari pendingin dengan suhu 4°C hingga prosedur lanjutan dilakukan. Sampel kemudian disaring dengan menggunakan pompa vakum (Rocker 410), *filter* yang digunakan adalah kertas saring selulosa dengan ukuran pori 0.45 µm (Whatman WCN 7141-104). Setelah penyaringan selesai, kemudian kertas saring dipindahkan ke cawan petri bersih untuk selanjutnya diidentifikasi secara visual keberadaan MP dengan menggunakan mikroskop stereo.

Sampel sedimen diambil sebanyak 3 kali pengulangan pada setiap titik dengan menggunakan sedimen *corer* (Ø 5 cm) pada zona litoral sungai (kedalaman berkisar 50 cm – 1m). Pengambilan sampel sedimen dilakukan pada lapisan paling atas sedimen sungai (5-7 cm). Pengambilan sampel sedimen dilakukan mengikuti pola 3 transek 1×1 m yang berjarak sekitar 10 meter antar transek (Gambar 3.B). Sampel sedimen yang diambil kemudian dimasukkan ke dalam *coolbox* berisi *gel-ice* untuk dibawa ke laboratorium.

Di laboratorium, sampel sedimen (bobot basah sekitar 400 g) kemudian dikeringkan di dalam oven (60°C selama 48 jam) hingga kering untuk kemudian dilakukan proses pemisahan densitas (Hidalgo-Ruz et al. 2012). Sebanyak 100 g bobot kering sedimen diambil dari sampel dan ditambahkan sekitar 300 ml larutan NaCl 30% (337 g bubuk NaCl analitis + 1 L akuades, densitas $\approx 1,2 \text{ g/cm}^3$) (Coppock et al. 2017; Alam et al. 2019). Sampel kemudian diaduk dengan menggunakan magnetik *stirrer* pada 1.200 rpm selama 2 menit. Sampel kemudian didiamkan pada temperatur ruang (27-28°C) selama 12 jam atau hingga terbentuk supernatan. Supernatan yang ada pada sampel kemudian disaring dengan metode yang sama seperti prosedur penyaringan sampel air. Kertas saring dari hasil penyaringan kemudian dipindahkan ke cawan petri bersih untuk proses pengamatan selanjutnya dengan menggunakan mikroskop stereo.

Proses identifikasi MP secara visual dilakukan dengan menggunakan mikroskop stereo (Euromax SB-1902) pada pembesaran 45 \times . Kertas saring diamati dengan mengikuti pola grid pada kertas saring, dengan pengamatan dilakukan per baris dari posisi grid paling atas ke grid paling bawah hingga seluruh grid pada kertas saring teramati. Setiap MP yang ditemukan pada sampel kemudian difoto dengan menggunakan kamera mikroskop (Dino-eye AM7025X) dan dipindahkan ke gelas objek untuk disimpan. Setiap MP yang ditemukan diidentifikasi jumlah, bentuk, warna dan ukurannya. Penentuan bentuk MP dilakukan dengan mengacu pada GESAMP (2019), yang menggolongkan MP ke dalam bentuk *line*, *fragment*, *film*, *foam*, dan *pellet* (Lampiran 3). Penggolongan warna MP mengacu pada Frias et al (2018). pengukuran panjang MP dilakukan dengan bantuan perangkat lunak ImageJ (ver 1.52a) menggunakan fungsi *measure* dan dilaporkan satuan milimeter (mm). Ukuran MP digolongkan menjadi MP ukuran kecil (<1 mm) dan ukuran besar (1-5 mm) (Rodríguez-Seijo & Pereira 2017; Lestari et al. 2020). Kelimpahan MP pada air kemudian diekspresikan dengan satuan MP/m³ dan pada sedimen dengan satuan MP/kg.

Identifikasi jenis polimer MP dilakukan di Laboratorium Kimia, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Serpong. Sebanyak 28 MP diidentifikasi jenis polimernya dengan menggunakan metode spektrofotometer inframerah (FTIR). FTIR dapat bekerja dengan mendeteksi perbedaan komposisi ikatan pada MP berdasarkan nilai serapan gelombang inframerah yang ditembakkan ke sampel (GESAMP 2019). Sampel MP diletakan pada ruang sampel dan diamati dengan menggunakan alat FTIR (Bruker tensor II) dipasangkan dengan aksesoris *attenuated total reflection* (ATR). Aksesoris ATR memungkinkan pengamatan MP hingga ukuran minimal 1 mm (Renner et al. 2017). Spektrum gelombang yang terbaca oleh alat kemudian dicocokkan dengan pustaka spektrum gelombang NICODOM untuk mengetahui jenis polimernya.

3. Kontrol kontaminasi

Beberapa prosedur dilakukan untuk mencegah adanya kontaminasi MP saat pengambilan dan pengamatan sampel. Semua peralatan yang digunakan pada penelitian ini sebelumnya sudah dicuci bersih dengan menggunakan air keran, dan kemudian dibilas dengan air murni (Onelab Waterone™) sebelum digunakan. Semua cawan petri berisi kertas saring juga selalu dalam posisi tertutup. Saat proses pengamatan visual dengan menggunakan mikroskop stereo, tutup dari cawan petri hanya dibuka tidak lebih dari 30 detik untuk mengambil MP yang ditemukan pada sampel untuk dipindahkan ke gelas objek. Permukaan meja kerja dan pakaian pengamat juga terlebih dahulu dibersihkan dengan *dust roller* (Bagus Micromate Lint Roller) sebelum melakukan pengamatan untuk menghilangkan debu dan serat pakaian pada ruang kerja.

Sampel blanko juga digunakan pada penelitian ini sebagai kontrol negatif. Blanko dibuat pada setiap 2 titik pengambilan sampel, sehingga secara keseluruhan diperoleh 12 blanko sampel sedimen dan 12 blanko sampel air yang dibuat selama pengambilan dan pemrosesan sampel. Blanko sampel air dibuat dengan membilas jaring *neuston* dengan menggunakan air murni (Onelab Waterone™) dan mengambil air yang ada di *cod-end* jaring sebelum jaring *neuston* net digunakan untuk mengambil sampel air. Blanko sampel sedimen dibuat pada saat proses pemisahan densitas pada sampel dilakukan. Sebanyak 600 ml larutan NaCl yang akan digunakan pada proses pemisahan densitas terlebih dahulu disaring dengan menggunakan kertas saring selulosa (besar pori 0.45 μm). kertas saring hasil penyaringan kemudian digunakan sebagai sampel blanko sedimen.

Untuk mengetahui tingkat kontaminasi dari udara pada saat pengamatan MP secara visual dilakukan, sebanyak 3 cawan petri berisi air murni diletakkan di sekitar mikroskop 30 menit sebelum pengamatan dilakukan dan dibiarkan terbuka selama proses pengamatan dilakukan. Kemudian cawan petri tersebut diamati keberadaan MP-nya setelah kegiatan identifikasi visual dilakukan. Selama pengamatan sampel air dan sedimen, telah dibuat 90 cawan sebagai kontrol negatif untuk mengidentifikasi kontaminasi dari udara.

4. Analisis data

Data kelimpahan MP pada air dan sedimen di setiap titik pengambilan sampel terlebih dahulu diuji normalitas distribusi dan homogenitas varian datanya. Jika memenuhi syarat normalitas dan homogenitas maka pengujian dilanjutkan dengan uji parametrik, dan apabila tidak memenuhi akan diuji dengan uji non parametrik. Uji ANOVA dan/atau Kruskal-Wallis digunakan untuk mengetahui adanya signifikansi kelimpahan MP antar 6 titik pengambilan sampel. Untuk melihat titik mana saja yang

memiliki perbedaan signifikan kelimpahan MP, digunakan uji lanjut Tukey atau Dunn. Untuk melihat perbedaan kelimpahan MP antara musim hujan dan musim kemarau digunakan uji-t atau Mann-Whitney. Bentuk, warna, ukuran dan jenis polimer MP yang ditemukan pada lokasi studi disajikan dalam grafik proporsi. Semua perhitungan statistik dan pembuatan grafik pada Bab ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Graphpad Prism versi 9.0.2(161)

C. Hasil

1. Kondisi kontrol kontaminasi

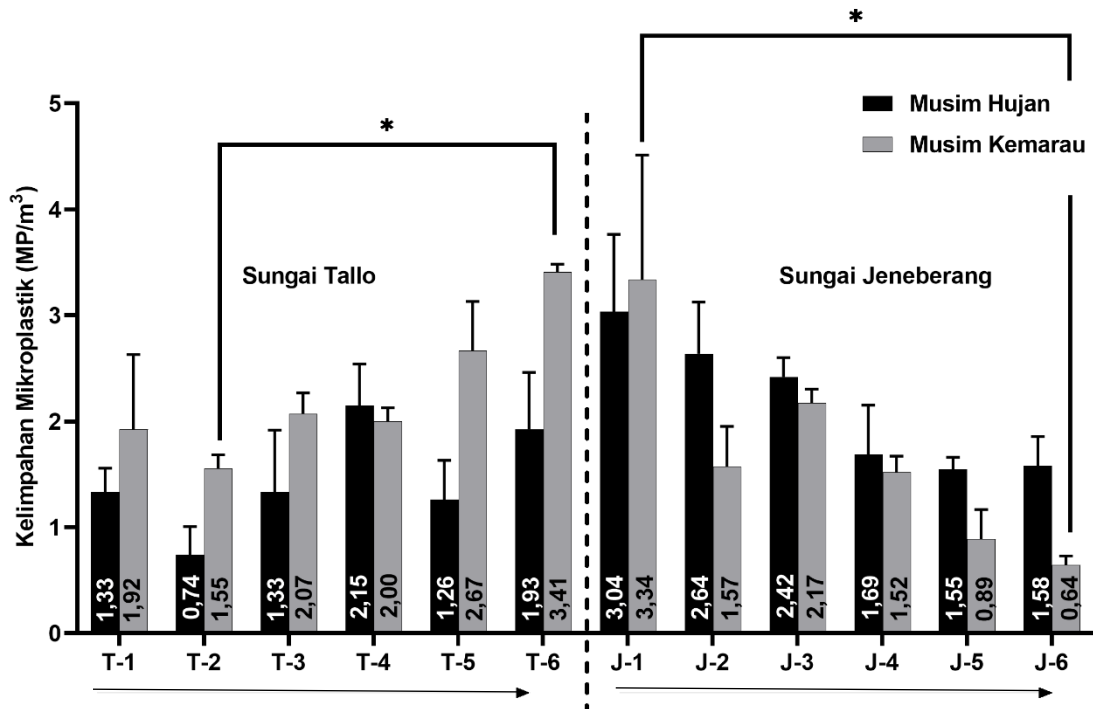
Mikroplastik tidak ditemukan pada semua blanko sampel air dan sedimen. pada kontrol negatif selama pengamatan visual MP, dari total 90 cawan petri yang digunakan selama pengamatan, hanya ditemukan 2 MP dengan bentuk *line* berwarna ungu dengan total kelimpahan akhir adalah 0,02 MP/blanko.

2. Kelimpahan MP pada sampel air dan sedimen

Mikroplastik yang ditemukan pada sampel air lokasi studi berkisar antara $0,7 \pm 0,3$ – $3,4 \pm 0,1$ MP/m³ ($\bar{x} \pm SD$) di Sungai Tallo dan $0,6 \pm 0,1$ – $3,3 \pm 1,2$ MP/m³ di Sungai Jeneberang (Gambar 4). Kelimpahan MP pada sampel air di Sungai Tallo secara umum lebih tinggi pada musim kemarau ($2,3 \pm 0,7$ MP/m³) jika dibandingkan dengan kelimpahan MP pada musim hujan ($1,4 \pm 0,5$ MP/m³) berdasarkan uji-t ($P < 0,05$). Sedangkan kelimpahan MP pada air di Sungai Jeneberang tidak berbeda secara signifikan antara musim hujan dan musim kemarau ($P > 0,05$). Perbedaan kelimpahan MP secara spasial berdasarkan uji statistik inferensial antar titik pengambilan sampel di kedua sungai hanya terjadi pada musim kemarau (Gambar 4). Di Sungai Tallo, terdapat perbedaan kelimpahan MP pada air di titik pengambilan sampel T-2 dengan T-6 berdasarkan uji ANOVA ($P < 0,05$) dengan titik T-6 yang terletak di bagian muara sungai memiliki rata-rata kelimpahan MP lebih tinggi. Hal serupa juga terjadi di Sungai Jeneberang pada musim kemarau, dengan adanya perbedaan rata-rata kelimpahan MP pada titik J-1 dengan J-6 berdasarkan uji ANOVA ($P < 0,05$), lokasi J-6 yang merupakan muara sungai rata-rata kelimpahan MP-nya lebih rendah dibandingkan dengan lokasi hulu. Tidak terdapat perbedaan rata-rata kelimpahan MP pada air antar titik pengambilan sampel pada musim hujan di kedua sungai berdasarkan uji ANOVA ($P > 0,05$).

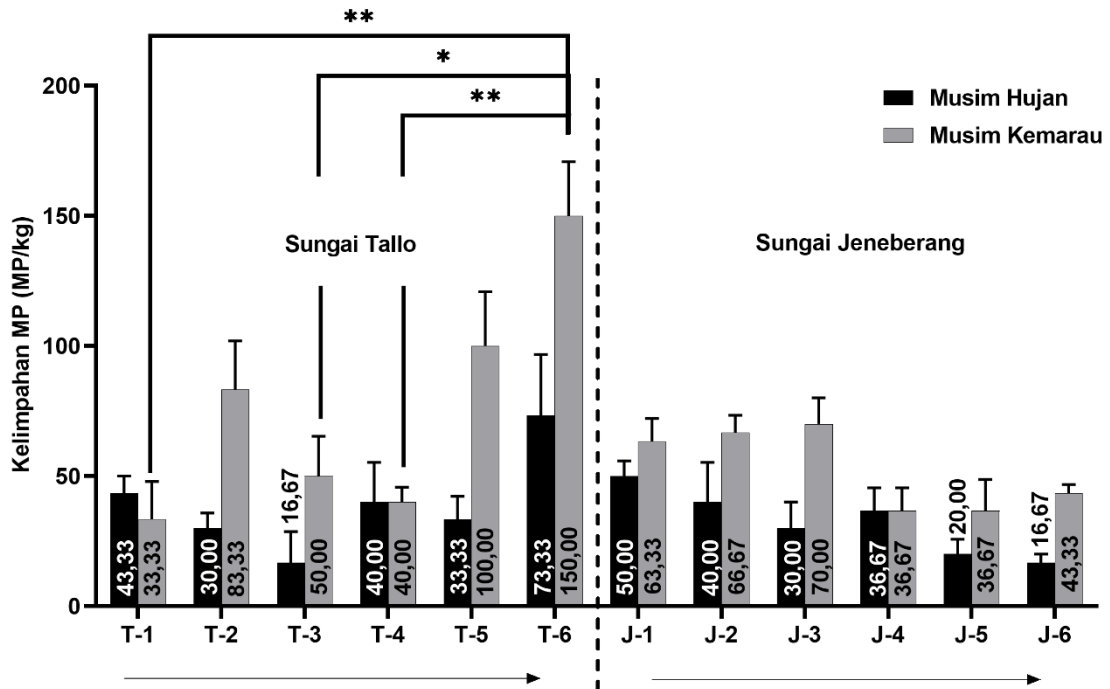
Walaupun tidak semua titik pengambilan sampel memiliki perbedaan rata-rata kelimpahan MP pada sampel air berdasarkan statistik inferensial, akan tetapi secara deskriptif kelimpahan MP pada sampel air antara kedua sungai memiliki tren spasial yang berbeda. Kelimpahan MP pada air di Sungai Tallo cenderung semakin meningkat dari hulu sungai menuju hilir/muara sungai. Sebaliknya, tren yang teramati pada Sungai

jeneberang menunjukkan hal yang sebaliknya, kelimpahan tinggi MP pada air terjadi di bagian paling hulu dari titik pengambilan sampel dan cenderung menurun seiring menuju hilir sungai.



Gambar 4. Kelimpahan MP pada sampel air di Sungai Tallo dan Jeneberang. Tanda *asterisk* menunjukkan perbedaan signifikan ($P < 0,05$) antar lokasi berdasarkan uji ANOVA dan dilanjutkan dengan uji lanjut Tukey. Tanda panah di bawah grafik menunjukkan posisi titik pengambilan sampel dari arah hulu ke hilir.

Mikroplastik juga ditemukan pada sampel sedimen dari kedua sungai. Kelimpahan MP pada sampel sedimen di Sungai Tallo berkisar antara $16,7 \pm 12,1$ - $150 \pm 20,8$ MP/kg, sedangkan di Sungai Jeneberang berkisar antara $16,7 \pm 3,3$ - 70 ± 10 MP/kg (Gambar 5). Kelimpahan MP pada sampel sedimen di Sungai Jeneberang memiliki kelimpahan lebih tinggi pada musim kemarau ($52,8 \pm 15,6$ MP/kg) jika dibandingkan dengan musim hujan ($32,2 \pm 12,6$ MP/kg) berdasarkan uji t ($P < 0,05$). Sedangkan di Sungai Tallo, tidak terdapat perbedaan signifikan antara kelimpahan MP sedimen antara musim hujan dan musim kemarau ($P > 0,05$).



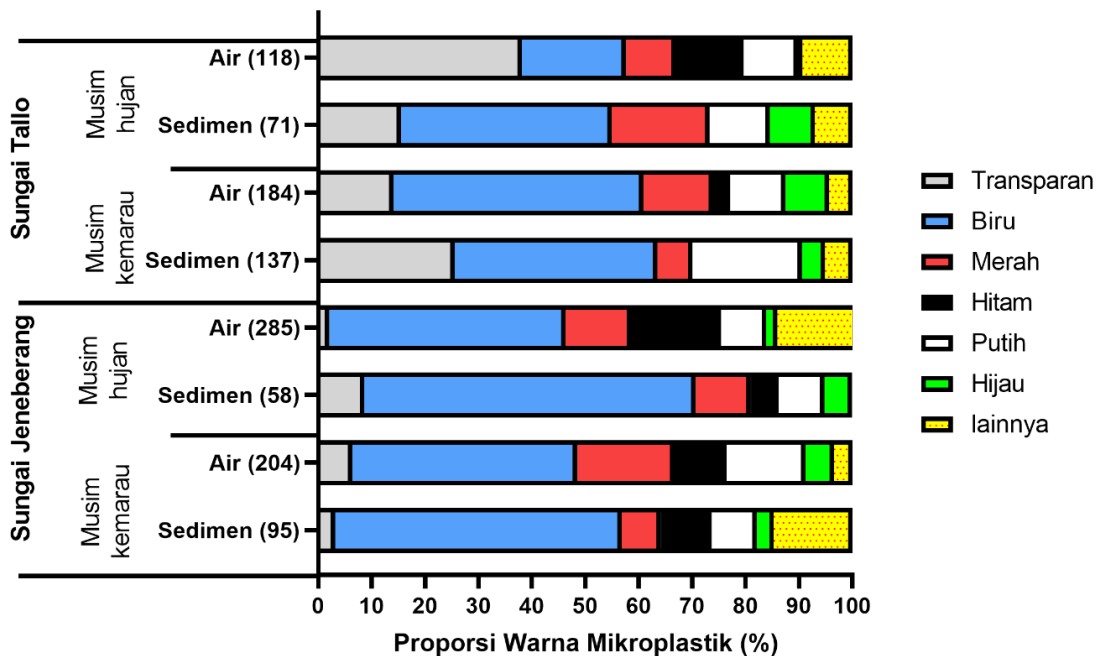
Gambar 5. Kelimpahan MP pada sedimen di Sungai Tallo dan Sungai Jeneberang. Tanda *asterisk* menunjukkan perbedaan signifikan ($P < 0,05$), tanda *asterisk* ganda menunjukkan perbedaan sangat signifikan ($P < 0,01$) antar lokasi berdasarkan uji ANOVA dan dilanjutkan dengan uji lanjut Tukey. Tanda panah di bawah grafik menunjukkan posisi titik pengambilan sampel dari arah hulu ke hilir

Perbedaan kelimpahan MP pada sampel sedimen secara signifikan hanya terjadi pada sedimen Sungai Tallo di musim kemarau. Kelimpahan MP pada sampel sedimen di titik T-1, T-3 dan T-4 secara signifikan lebih rendah apabila dibandingkan dengan titik T-6 yang berada di hulu sungai berdasarkan uji ANOVA ($P < 0,05$). Terdapat peningkatan kelimpahan MP pada sedimen di titik T-2 di Sungai Tallo pada musim kemarau. Tidak terdapat perbedaan kelimpahan MP secara spasial pada sedimen di Sungai Jeneberang berdasarkan uji Kruskal-Wallis baik pada musim kemarau maupun musim hujan ($P > 0,05$). Akan tetapi jika digambarkan secara deskriptif, pada musim kemarau terdapat peningkatan kelimpahan MP pada titik J1-J3, kemudian kelimpahannya menurun pada titik J4-J6. Sedangkan pada musim hujan, kelimpahan sedimen di Sungai Jeneberang cenderung tinggi pada lokasi hulu dan rendah pada lokasi muara, mengikuti pola serupa dengan kelimpahan MP yang ada pada kompartemen air. Data MP pada air dan sedimen di kedua sungai dapat dilihat pada lampiran 4.

3. Profil warna, bentuk, ukuran dan polimer MP pada kedua sungai

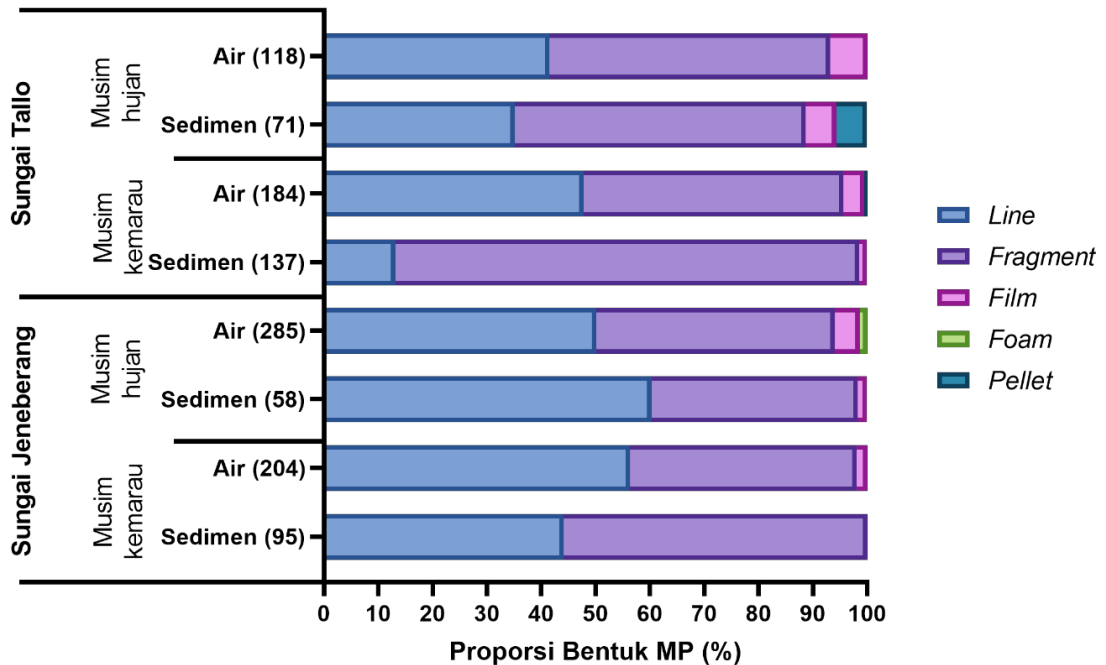
Secara umum, setidaknya ditemukan 6 warna MP pada kedua lokasi sungai (Gambar 6). Warna biru menjadi warna yang secara umum dominan ditemukan pada kedua sungai, baik pada sampel air maupun sedimen (19,5 – 62,1%). Mikroplastik

dengan warna hitam di Sungai Tallo hanya ditemukan pada kompartemen air (3,30 – 12,71%), dan tidak ditemukan pada kompartemen sedimen. Warna hijau menjadi warna yang paling jarang ditemukan di Sungai Tallo dengan proporsi hanya berkisar antara (0,85 – 8,45%). Sungai Jeneberang memiliki proporsi MP transparan (2,11 – 8,62%) yang lebih sedikit jika dibandingkan dengan Sungai Tallo (14,13 – 38,14%). Mikroplastik dengan warna hijau juga menjadi MP dengan proporsi yang paling sedikit (2,11 – 5,39%) diantara warna-warna MP lain di Sungai jeneberang.



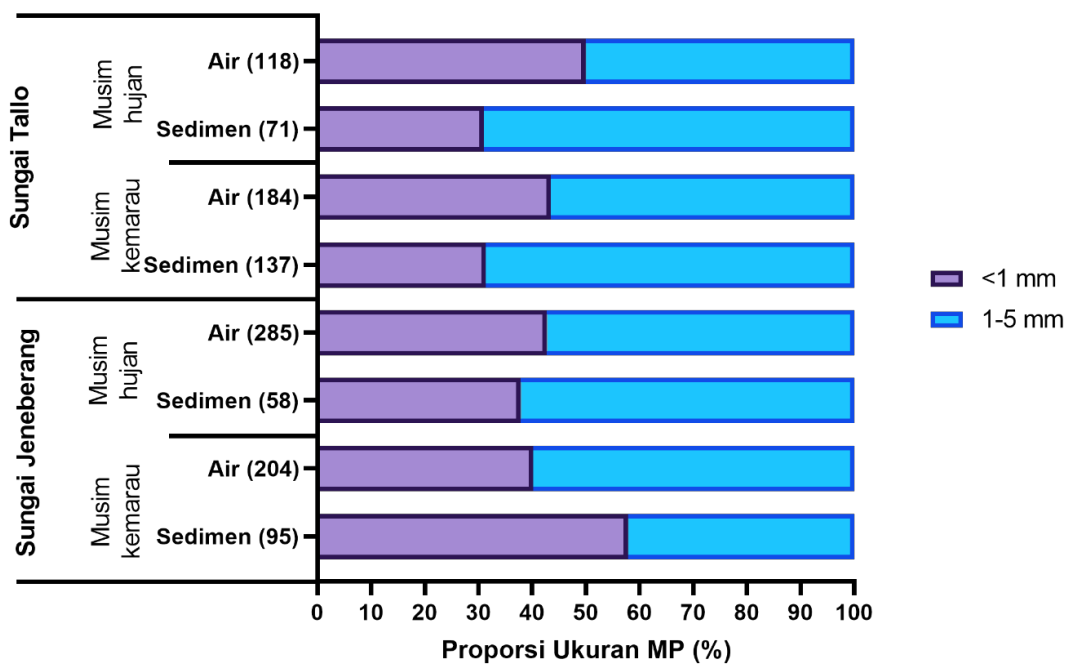
Gambar 6. Proporsi warna MP berdasarkan kompartemen (n) di lokasi studi.

Berdasarkan bentuk MP, kedua sungai didominasi oleh bentuk *line* dan *fragment* (Gambar 7). Mikroplastik di Sungai Tallo lebih banyak didominasi oleh bentuk *fragment* (47,83 – 85,40%) jika dibandingkan dengan bentuk MP lainnya seperti *line* (13,13 – 47,83%), *film* (1,46 – 6,78%) dan *pellet* (0 – 5,63%). Terdapat proporsi MP dalam bentuk *pellet* di sedimen Sungai Tallo pada musim hujan (5,63%), dimana MP dalam bentuk *pellet* tidak ditemukan di kompartemen air dan sedimen pada musim kemarau. Sungai Jeneberang cenderung didominasi oleh MP dalam bentuk *line* (44,21% - 60,34%) dibandingkan dengan MP dalam bentuk lain seperti *fragment* (37,93 – 55,79%), *film* (0 – 4,56%) dan *foam* (0 - 1,40%). Kelimpahan MP dalam bentuk *foam* hanya ditemukan pada air Sungai Jeneberang pada musim hujan (1,40%) dan tidak ditemukan pada kompartemen dan lokasi lain.



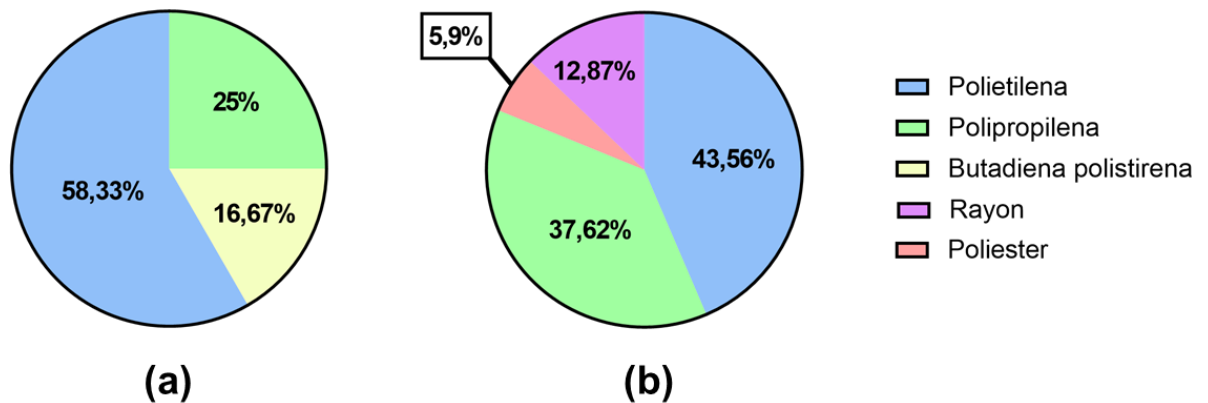
Gambar 7. Proporsi bentuk MP berdasarkan kompartemen (n) di lokasi studi

Mikroplastik yang ditemukan pada Sungai Tallo dan Jeneberang secara umum lebih banyak terdapat MP ukuran besar (1-5 mm; 42,11 – 69,01%) (Gambar 8). Di Sungai Tallo, Kompartemen sedimen memiliki MP yang lebih besar secara ukuran jika dibandingkan dengan kompartemen air. Ukuran MP pada sedimen Sungai Jeneberang di Musim kemarau memiliki proporsi MP ukuran kecil lebih banyak (57,89%) jika dibandingkan MP ukuran besar.



Gambar 8. Proporsi kelas ukuran MP berdasarkan kompartemen (n) di lokasi studi

Berdasarkan hasil identifikasi polimer MP, setidaknya ditemukan 5 jenis polimer pada lokasi studi (Gambar 9). Mikroplastik pada sampel air teridentifikasi sebagai polimer polietilena (58,33%), polipropilena (25%) dan butadiena polistirena (16,67%). Jenis polimer MP pada sampel sedimen terdiri dari polietilena (43,56%), polipropilena (37,62%), rayon (12,87%) dan poliester (8,33%). Mikroplastik dengan jenis polimer butadiena polistirena hanya ditemukan pada kompartemen air, sedangkan poliester dan rayon hanya ditemukan pada kompartemen sedimen.



Gambar 9. Hasil identifikasi polimer MP pada air (a) dan sedimen (b) di lokasi studi. Air (n=12), Sedimen (n=16)

D. Pembahasan

Sungai Tallo dan Jeneberang merupakan lokasi perairan yang sangat rentan terhadap cemaran MP yang berasal dari Kota Makassar. Mikroplastik pada lingkungan sungai umumnya dapat berasal dari tekanan antropogenik seperti kegiatan domestik, industri, pengolahan air limbah dan pertanian (Dris et al. 2018; Hitchcock & Mitrovic 2019). Keberadaan MP yang ditemukan pada keseluruhan titik pengambilan sampel baik pada sampel air maupun sedimen, menunjukkan bahwa lingkungan sungai di Kota Makassar telah terkontaminasi oleh cemaran MP.

Jika ditinjau dari profil MP yang ada pada kompartemen air, kelimpahan MP di Sungai Tallo dan Jeneberang secara umum masih jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan kelimpahan MP yang dilaporkan di beberapa lokasi sungai di Pulau Jawa. Sungai Surabaya dilaporkan memiliki kelimpahan rata-rata MP pada air sebesar 21 MP/m³, bahkan pada lokasi lain seperti di Sungai Ciwalengke dapat mencapai sekitar 600 MP/m³ (Alam et al. 2019; Lestari et al. 2020). Perbedaan kelimpahan MP ini mungkin disebabkan oleh perbedaan keberadaan sumber MP pada lingkungan sungai. Sungai Ciwalengke merupakan salah satu sungai yang terletak di lokasi padat penduduk dan industri di Kabupaten Bandung, sedangkan Sungai Surabaya mengalir melalui Kota Surabaya yang merupakan salah satu kota padat penduduk di Pulau Jawa. Kedua Sungai tersebut juga berbatasan secara langsung dengan lingkungan kota berpenduduk

padat. Keberadaan tekanan antropogenik tepat pada tepi sungai mungkin dapat menjadi sumber cemaran MP bagi lingkungan sungai di Pulau Jawa, sehingga kelimpahan MP pada lokasi tersebut menjadi sangat tinggi.

Sebaliknya di lokasi studi, meski terletak di tengah kota, akan tetapi bagian tepi Sungai Tallo di Kota Makassar masih ditumbuhi oleh ekosistem bakau. Keberadaan ekosistem bakau dapat berfungsi sebagai penangkap MP yang masuk ke lokasi sungai. Sedimen bakau yang berupa lumpur dapat menangkap partikel MP hingga 8 kali lebih banyak jika dibandingkan dengan sedimen tanpa keberadaan tanaman bakau (Zhou et al. 2020). Keberadaan bakau di sekitar pinggir sungai mungkin dapat mencegah masuknya MP melalui air limpasan untuk masuk ke dalam lingkungan sungai (Govender et al. 2020). Kondisi ini kemudian dapat membuat kelimpahan MP yang ada pada sampel air di Sungai Tallo menjadi lebih rendah.

Kelimpahan MP di Sungai Tallo lebih tinggi pada musim kemarau apabila dibandingkan dengan musim hujan. Hal serupa tidak terjadi pada sungai Jeneberang yang kelimpahan MP pada air tidak berbeda antara musim hujan dan musim kemarau. Kondisi peningkatan kelimpahan MP pada kompartemen air di musim kemarau juga sudah teramati pada beberapa sungai lain, misalnya saja pada sungai Maozhou dan Yellow di China (Han et al. 2020; Wu et al. 2020). Perbedaan kelimpahan MP pada air di lokasi studi dapat bergantung pada perbedaan topografi, curah hujan, dan pengelolaan air limbah pada lokasi sungai (Wu et al. 2020). Sungai Tallo sendiri memang sangat terpengaruh oleh curah hujan. Pada saat curah hujan tinggi, tinggi muka air di Sungai Tallo dapat meningkat hingga 2 kali dibandingkan dengan tinggi muka air saat curah hujan rendah (Lopa et al. 2015). Keadaan peningkatan tinggi muka air pada sungai dapat meningkatkan luasan permukaan sungai, sehingga dapat mengurangi konsentrasi MP pada permukaan air. Pada musim hujan juga dapat terjadi peningkatan debit dan arus air pada sungai, yang juga dapat berujung pada penurunan nilai kelimpahan MP pada musim hujan (Watkins et al. 2019; Wang et al. 2021). Sebaliknya, Sungai Jeneberang memiliki variasi ketinggian muka air yang lebih rendah dibandingkan Sungai Tallo, dikarenakan berbagai infrastruktur yang ada pada sungai Jeneberang, seperti keberadaan bendungan yang fungsinya adalah menjaga debit dan tinggi muka air. Keberadaan infrastruktur di Sungai Jeneberang membuat pengaturan debit air dan ketinggian muka air lebih mudah dilakukan (Arafat et al. 2015), yang berakibat pada kecenderungan kesamaan kelimpahan MP antara musim hujan dan kemarau.

Kelimpahan MP yang ada pada sampel sedimen di lokasi studi juga memiliki kelimpahan yang cenderung lebih rendah jika dibandingkan beberapa pelaporan kelimpahan MP pada sedimen sungai di Pulau Jawa. Sedimen Sungai Ciwalengke dilaporkan memiliki kelimpahan MP sekitar 300 MP/kg, Sedimen di Sungai Surabaya

juga dapat mencapai 590 MP/kg, bahkan di Sungai yang bermuara ke Teluk Jakarta dapat mencapai kisaran 18.000 - 38.000 MP/kg (Manalu et al. 2017; Alam et al. 2019; Firdaus et al. 2020). Tingginya nilai kelimpahan MP pada sedimen pada lokasi tersebut mungkin diakibatkan peningkatan tekanan antropogenik pada daerah tangkapan air yang kemudian berujung pada peningkatan kelimpahan MP di lingkungan sungai. Kota Jakarta, tempat di mana kelimpahan MP pada sedimen sungai nya melebihi 18.000 MP/kg, merupakan lokasi dengan jumlah penduduk lebih dari 10 juta orang, sekitar 7,5 kali lebih banyak dibandingkan dengan jumlah penduduk di Kota Makassar (BPS Indonesia, 2019).

Berdasarkan musimnya, kelimpahan MP pada sedimen sungai cenderung lebih tinggi di Musim Kemarau. Hal serupa juga teramati pada sungai Maozhou, dengan kelimpahan MP pada sedimen juga meningkat pada musim kemarau (Wu et al. 2020). Hal ini diduga berkaitan erat dengan kecepatan arus sungai. Kelimpahan MP pada sungai secara umum akan berkurang seiring peningkatan arus air (Ding et al. 2019; Sarkar et al. 2019). Pada kecepatan arus rendah, MP secara umum tidak terlalu terpengaruh oleh hidrodinamika air sungai, yang berujung pada MP dengan densitas tinggi ($> 1\text{g/cm}^3$) menjadi lebih mudah untuk tenggelam. Sedangkan MP dengan densitas yang rendah juga akan lebih mudah untuk terlapisi oleh biofilm dan menyebabkan densitasnya menjadi meningkat (Wright, Thompson, et al. 2013). Keadaan ini akan membuat MP memiliki kecenderungan untuk tenggelam ke dasar perairan dan meningkatkan kelimpahan MP pada sedimen sungai di Musim Kemarau.

Sungai Tallo dan Jeneberang memiliki tren spasial yang berbeda berdasarkan kelimpahan MP-nya. Kelimpahan MP di Sungai Tallo memiliki kecenderungan untuk rendah pada bagian hulu dan kelimpahannya semakin tinggi seiring lokasinya menuju hilir, sebaliknya di Sungai Jeneberang kelimpahan MP pada hulu cenderung lebih tinggi, dan kelimpahannya akan berkurang seiring lokasinya menuju ke hilir sungai. Kondisi ini kemungkinan besar dipengaruhi oleh perbedaan karakteristik aliran di kedua sungai. Sungai Jeneberang diketahui memiliki beberapa bendungan sepanjang aliran-nya. Pada lokasi pengambilan sampel di Sungai Jeneberang setidaknya terdapat 3 bendungan kecil yang berfungsi untuk menjaga muka air sungai seperti Bendungan Sungguminasa, Tamalate dan Karet. Keberadaan bendungan pada sungai cenderung memerangkap bahan pencemar di lokasi belakang bendungan. Fenomena penumpukan bahan pencemar pada lokasi bendungan sudah banyak teramati pada beberapa jenis bahan pencemar lain, seperti pada pencemaran logam (Najamuddin et al. 2016; Watkins et al. 2019).

Pada pencemaran MP, fenomena penahanan partikel MP oleh keberadaan *barrier* pada sungai sudah beberapa kali di laporkan. Misalnya saja di Sungai Qing, China,

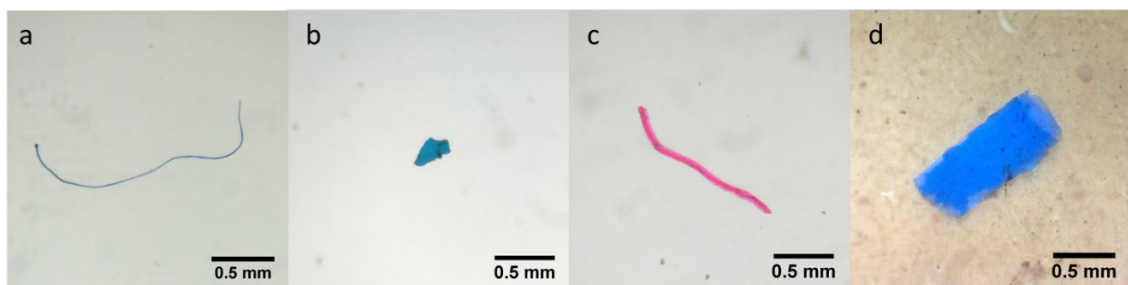
dilaporkan bahwa kelimpahan MP pada kompartemen air di belakang bendungan lebih tinggi sekitar 80% jika dibandingkan dengan kelimpahan MP yang ada di lokasi setelah bendungan (Wang et al., 2020), hal ini mengindikasikan adanya fenomena retensi MP oleh keberadaan bendungan pada sungai. Keberadaan infrastruktur dan/atau *obstacle* pada sungai (Contoh: bendungan, pilar jembatan dll) dapat secara signifikan menurunkan kecepatan arus akibat dari berkurangnya momentum massa air (Fenton 2008). Rendahnya kecepatan arus ini kemudian dapat meningkatkan waktu retensi MP pada lingkungan sungai. Peningkatan waktu retensi ini membuat kelimpahan MP yang berada pada bagian hulu bendungan menjadi lebih tinggi di Sungai Jeneberang. Sedangkan di Sungai Tallo di mana tidak terdapat bendungan, fenomena ini tidak terjadi, Sehingga kelimpahan MP di Sungai Tallo akan meningkat seiring massa air menuju lokasi hilir sungai akibat penambahan *input* MP sepanjang aliran sungai.

Selain itu, tren kelimpahan MP pada lokasi studi juga mungkin dipengaruhi oleh lokasi sumber pencemaran MP. Salah satu sumber utama dari pencemaran MP di lingkungan perkotaan adalah keberadaan aktivitas antropogenik di lokasi berpenduduk (Alam et al. 2019; Lestari & Trihadiningrum 2019) . Keberadaan lokasi berpenduduk di Sungai Tallo cenderung berada di muara sungai, yang pada lokasi tersebut terdapat pemukiman padat penduduk. Selain itu, muara Sungai Tallo juga menjadi lokasi bermuaranya kanal pampang yang mungkin membawa MP yang berasal dari pusat Kota Makassar. Sedangkan di Sungai Jeneberang, keberadaan lokasi padat penduduk cenderung berada di hulu hingga pertengahan sungai, dan di bagian muara sungai cenderung didominasi oleh persawahan. Hal tersebut mungkin berpeluang untuk meningkatkan kelimpahan MP di muara Sungai Tallo dan juga bagian hulu - pertengahan Sungai Jeneberang.

Selain kelimpahan MP, warna MP juga menjadi salah satu informasi penting terkait pencemaran MP di perairan. Warna MP dapat menjadi salah satu informasi awal dalam menduga sumber dan juga *aging* dari MP (Rodríguez-Seijo & Pereira 2017). Misalnya saja, MP transparan sering diasosiasikan dengan polimer polipropilena yang biasa digunakan untuk membuat kemasan makanan. Warna MP yang sudah mengalami penguningan juga terasosiasi dengan fotooksidasi dan *weathering* MP (Andrady 2017). Secara umum, warna MP yang paling sering ditemukan di lingkungan sungai adalah Biru, Transparan dan merah (Fan et al. 2019; Jiang et al. 2019). Hal serupa juga terlaporkan di lokasi studi, warna MP dominan yang banyak ditemukan di Sungai Tallo dan Jeneberang adalah warna biru dan transparan. Warna MP yang berpigmen biasanya dapat berasal dari cemaran tekstil dan polimer cat yang biasanya menggunakan polimer dengan warna yang beragam. Warna MP juga dapat mempengaruhi preferensi ikan dalam *uptake* MP. Beberapa ikan dilaporkan memiliki

preferensi untuk mengonsumsi MP dengan warna yang cerah seperti pada warna biru, putih dan transparan (Crawford & Quinn 2017). Sehingga dominasi MP dengan warna biru dan transparan di lokasi studi mungkin saja dapat membuat MP tersebut dapat bersifat lebih tersedia secara biologis bagi organisme akuatik sungai. Mikroplastik yang ditemukan di perairan pesisir Kota Makassar menunjukkan pola yang serupa dengan yang ditemukan pada kedua sungai, dengan warna dominan MP biru dan transparan (Afdal et al. 2019). Hal ini mungkin dapat menjadi indikasi awal dugaan bahwa MP yang ada di Pesisir Kota Makassar mungkin berasal dari lingkungan sungai-sungai di Kota Makassar.

Selain warna MP, bentuk juga menjadi salah satu karakteristik penting MP. Bentuk dari MP dapat menyerupai mangsa alami ikan, sebagai contoh, MP dengan bentuk *line* memiliki bentuk yang serupa dengan alga berfilamen yang banyak terdapat di lingkungan perairan (Cole et al. 2011; Dris et al. 2015). Kemudian bentuk MP juga dapat menjadi salah satu indikator sumber dari cemaran MP. Proporsi tinggi MP dengan bentuk *line* dan *fragment* di lokasi studi dapat menjadi salah satu indikator bahwa MP yang ditemukan di kedua sungai cenderung berasal dari cemaran tekstil, tali dan juga fragmentasi MP yang lebih besar. Hal ini menunjukkan MP yang ada di Sungai Tallo dan Jeneberang kemungkinan termasuk ke dalam MP sekunder (da Costa et al. 2017). Beberapa representatif bentuk dan warna MP di lokasi studi dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Representatif sampel MP: *Line* Biru (A) dan Merah (c); *Fragment* biru (b); dan *film* biru (d)

Berdasarkan ukurannya, MP dapat digolongkan menjadi MP kecil ($1\mu\text{m} - 1\text{ mm}$) dan MP besar ($1 - 5\text{ mm}$) (Rodríguez-Seijo & Pereira 2017; Lestari et al. 2020). Mikroplastik yang ditemukan di lingkungan Sungai Tallo dan Jeneberang pada umumnya termasuk pada MP besar ($> 1\text{ mm}$). Mikroplastik berukuran kecil dapat dijadikan suatu indikasi awal partikel MP telah mengalami degradasi (secara fisik-kimia) lebih lanjut (Firdaus et al. 2020). Ukuran MP dapat secara gradual berkurang seiring keberadaan mekanisme degradasi di sungai, seperti keberadaan mekanisme fotodegradasi, fisik-mekanik, *weathering* dan biodegradasi. Semakin lama suatu plastik berada pada suatu lingkungan, biasanya kelimpahannya akan semakin tinggi tetapi ukurannya akan

semakin kecil. Semakin kecil suatu ukuran MP juga akan lebih bersifat tersedia secara biologis oleh organisme akuatik (Cole et al. 2013).

Berdasarkan jenis polimer dari sampel MP, Jenis polimer polietilena diketahui memiliki proporsi paling besar pada air dan sedimen di lokasi studi. Polietilena saat ini memang diketahui sebagai jenis polimer yang paling banyak diproduksi di dunia, mencapai 36% dari total produksi plastik (Geyer et al. 2017). Polietilena menjadi sangat umum digunakan karena pengaplikasiannya untuk berbagai macam hal seperti wadah makanan, tas, tali, pipa, rak dan berbagai pengaplikasian plastik cetak lainnya (Crawford & Quinn 2017). Keberadaan polimer butadiena polistirena pada penelitian ini hanya ditemukan pada sampel air. Butadiena polistirena adalah jenis plastik yang biasanya digunakan sebagai bahan lapisan anti abrasi yang biasa digunakan pada ban kendaraan dan sol sepatu. Densitas yang rendah dari polimer butadiena polistirena ($0,94 \text{ g/cm}^3$) membuat tipe polimer ini akan cenderung berada pada permukaan air. Mikroplastik dengan polimer rayon dan poliester memiliki masa jenis yang lebih tinggi dari air ($1,5 \text{ g/cm}^3$ dan $1,35 \text{ g/cm}^3$, berurutan), sehingga MP dengan jenis polimer ini akan cenderung tenggelam di sedimen. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi nasib MP di dalam air biasanya juga berkaitan dengan faktor hidrodinamika air, tingkat *weathering* MP, dan juga massa jenis dari air (yang biasanya terkait dengan nilai salinitas air).

Penelitian ini memberikan gambaran umum mengenai profil kondisi cemaran MP di Sungai-sungai Kota Makassar. Keberadaan MP pada keseluruhan titik pengambilan sampel pada studi ini diharapkan mendapatkan perhatian yang serius, mengingat MP memiliki dampak potensial terhadap keadaan ekosistem sungai. Nilai kelimpahan MP di lokasi studi yang masih jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan sungai-sungai yang ada di Pulau Jawa harus menjadi dorongan bagi pihak-pihak terkait peningkatan pengelolaan dan pengoleksian sampah padat di Kota Makassar, sebelum Sungai-sungai di Kota Makassar lebih tercemar oleh MP di masa yang akan datang. Penelitian lanjutan perlu dilakukan untuk melihat apakah MP yang ada di Sungai-sungai Kota Makassar sudah masuk ke dalam organisme akuatik yang berhabitat di lingkungan sungai. Hal ini sangat penting mengingat Sungai Tallo dan Jeneberang masih dijadikan salah satu lokasi kegiatan penangkapan komoditas perikanan untuk kebutuhan konsumsi masyarakat.

E. Kesimpulan dan Saran/Rekomendasi

Sungai-sungai yang ada di Kota Makassar telah terkontaminasi oleh cemaran MP. Kelimpahan MP yang ada pada Sungai-sungai di Kota Makassar secara umum dipengaruhi oleh variasi musim, dengan kelimpahan MP pada air dan sedimen secara umum yang lebih tinggi terjadi di Musim Kemarau. Tren kelimpahan secara spasial

berbeda antara kedua sungai, yang kemungkinan besar dipengaruhi oleh keberadaan bendungan. Kelimpahan MP yang masih rendah dibandingkan dengan sungai-sungai lain di Indonesia, meningkatkan kebutuhan tindakan pencegahan pencemaran MP sebelum pencemaran ini menjadi lebih buruk di masa yang akan datang. Dengan tercemarnya lingkungan Sungai di Kota Makassar, disarankan untuk melakukan penelitian lanjutan profil cemaran MP pada kompartemen organisme akuatik yang sering dimanfaatkan oleh masyarakat sebagai komoditas konsumsi.

III. Keberadaan Mikroplastik pada Biota Perairan Hasil Tangkapan di Sungai-sungai Kota Makassar

Abstrak

Pencemaran mikroplastik (MP) telah terjadi pada lingkungan Sungai di Kota Makassar. Akan tetapi, hingga saat ini belum ada data terkait dengan profil cemaran MP pada biota perairan hasil tangkapan yang berasal dari lokasi tersebut. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kelimpahan dan karakteristik MP yang ada pada biota perairan dari Sungai Tallo dan Jeneberang, Kota Makassar. Biota perairan hasil tangkapan di lokasi studi berdasarkan spesiesnya memiliki kelimpahan MP rata-rata berkisar antara 0,6 – 2,5 MP/individu. Berdasarkan kebiasaan makannya, Kelimpahan MP pada ikan herbivor (1,7 MP/individu) secara umum lebih tinggi dibandingkan dengan karnivor (1,1 MP/individu). Karakteristik MP yang ada pada biota perairan di lokasi studi didominasi oleh bentuk *Line* (44,74 – 94,12%), warna biru (25 – 86,26%) dan oleh MP berukuran besar (1-5 mm). Mikroplastik yang ditemukan pada biota perairan terdiri dari polimer polietilena, polipropilena, poliester dan rayon. Penelitian ini memunculkan dugaan adanya peranan tanaman air di lokasi Sungai terhadap *uptake* MP oleh ikan di lokasi studi. Penelitian lanjutan terkait dengan dampak MP pada spesies ikan sungai di lokasi studi penting untuk dilakukan.

A. Pendahuluan

Pencemaran mikroplastik (MP) saat ini sudah menjadi salah satu masalah lingkungan secara global. Mikroplastik secara umum berasal dari kegiatan antropogenik yang ada di daratan, kemudian masuk ke sungai dan terbawa ke lingkungan Laut (Jambeck et al. 2015; Lebreton et al. 2017). Kota Makassar sebagai salah satu lokasi yang memiliki tekanan antropogenik tinggi, memiliki peluang untuk memberikan masukan MP pada lingkungan sungai. Penelitian yang dilakukan di perairan pesisir Kota Makassar menunjukkan adanya kontaminasi MP yang secara umum berpusat pada muara sungai di Kota Makassar (Afdal et al. 2019). Penelitian yang dilakukan di lokasi estuari juga menunjukkan adanya kelimpahan MP yang cukup tinggi pada air permukaan yang berdekatan dengan badan Sungai di Kota Makassar (Wicaksono et al. 2020). Keberadaan MP pada lingkungan perairan dapat menjadi ancaman terhadap ekosistem, dan lebih lanjut pada kesehatan manusia (Galloway 2015; Santillo et al. 2017; Barboza et al. 2018).

Mikroplastik yang terdistribusi pada lingkungan perairan, dapat dikonsumsi oleh biota perairan. Dengan keberadaan bahan aditif plastik dan adanya polutan lain yang

terabsorpsi pada MP, maka keberadaan MP dapat bersifat toksik bagi organisme perairan yang terekspos (Rochman 2015). Keberadaan MP pada biota perairan diketahui dapat menyebabkan inflamasi, translokasi MP, gangguan sistem endokrin, gangguan metabolisme, penurunan sintasan, dan kerusakan jaringan pada organisme (Rochman et al. 2014; Choi et al. 2018; Ding et al. 2018; Jabeen et al. 2018; Xiong et al. 2018). Selain itu, MP juga dapat berpindah melalui jejaring makanan, hal ini menjadikan MP dapat mengancam kesehatan manusia sebagai puncak rantai makanan (Santillo et al. 2017).

Di Kota Makassar, keberadaan MP sudah banyak dilaporkan pada komoditas biota konsumsi laut (Tahir & Rochman 2014; Rochman et al. 2015; Tahir et al. 2019, 2020). Akan tetapi hingga saat ini, pelaporan mengenai cemaran MP pada biota konsumsi perairan estuari dan tawar masih sangat terbatas di Kota Makassar, terutama pada lingkungan sungai yang menjadi lokasi penangkapan dan budidaya ikan (Bahri et al. 2020; Wicaksono et al. 2020). Sehingga diperlukan suatu penelitian untuk mengevaluasi profil pencemaran MP yang ada pada biota perairan dari Sungai-sungai di Kota Makassar. Hal ini penting mengingat masih banyak biota perairan sungai yang masih dimanfaatkan oleh masyarakat untuk kebutuhan konsumsi.

Tujuan penelitian ini adalah untuk menghitung kelimpahan dan mengevaluasi profil cemaran MP pada biota perairan hasil tangkapan dari Sungai Tallo dan Jeneberang, sebagai sungai utama di Kota Makassar. Penelitian ini dapat memberikan gambaran lebih lengkap mengenai nasib MP di perairan sungai, setelah pada tahapan penelitian sebelumnya MP sudah ditemukan terdistribusi pada air dan sedimen di Sungai-sungai yang ada di Kota Makassar. Penelitian ini dapat menjadi dasar dalam penilaian risiko pencemaran MP yang ada di Kota Makassar.

B. Metode Penelitian

1. Persetujuan komisi etik

Semua prosedur terkait dengan pengambilan, penanganan dan pembedahan sampel biota pada penelitian ini telah mendapatkan persetujuan dari komisi etik Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Hasanuddin dengan nomor protokol 3648/UN4.14.1/TP.02.02/2021 terkait etik penelitian dengan menggunakan hewan.

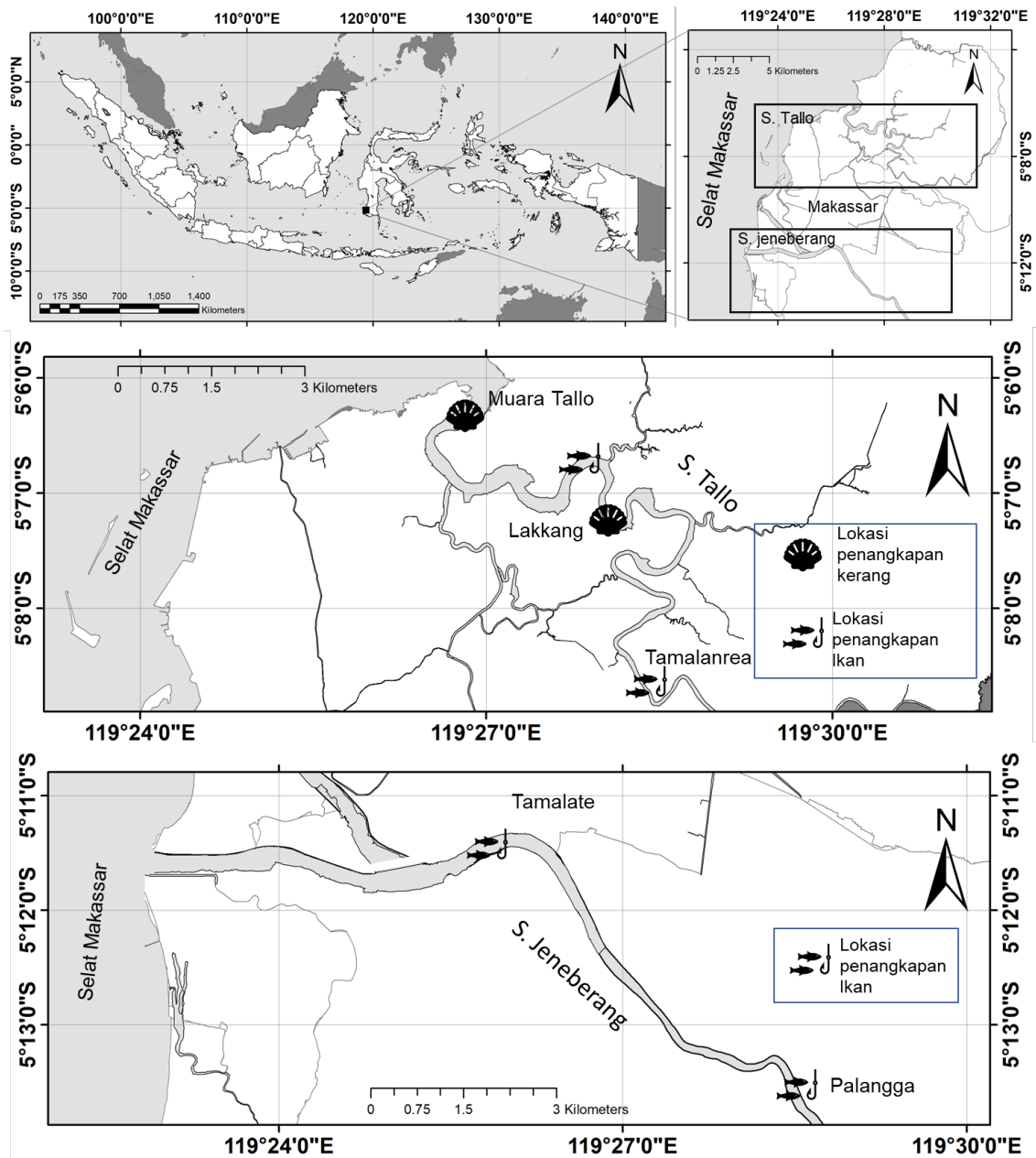
2. Lokasi studi dan koleksi sampel

Sampel biota perairan (kerang dan ikan) diambil dari Sungai Tallo dan Jeneberang secara bertahap pada bulan Maret – Agustus 2019. Di Sungai Tallo pengambilan ikan dilakukan pada lokasi Tamalanrea dan Lakkang. Di Sungai Jeneberang ikan ditangkap dari dua lokasi penangkapan ikan, yaitu lokasi Palangga dan

Tamalate (Gambar 11). Lokasi penangkapan ikan di Sungai Tallo didominasi oleh sempadan sungai alami yang ditumbuhi tanaman bakau dari spesies *N. fruticans*. Penangkapan ikan di Sungai Jeneberang dilakukan pada lokasi dengan sempadan sungai sudah dikonstruksi dengan menggunakan semen dan karung pasir untuk mencegah erosi, kebanyakan lokasinya juga berbatasan langsung dengan lingkungan pemukiman penduduk Kota Makassar dan Kabupaten Gowa. Di Sungai Tallo penangkapan ikan dilakukan dengan menggunakan alat tangkap jaring insang (Lakkang) dan jaring angkat (Tamalanrea). Sedangkan di Sungai Jeneberang, alat tangkap yang umum digunakan adalah jaring lempar (Tamalate) dan Bubu (Palangga). Semua waktu penangkapan ikan dilakukan di siang hari, kecuali pada alat tangkap Bubu yang dipasang pada sore hari (pukul 15.00-16.00) dan dipanen keesokan harinya (pukul 08.00-10.00).

Sampel kerang pada penelitian ini hanya diperoleh dari Sungai Tallo. Di Sungai Jeneberang, kerang bukan merupakan komoditas tangkapan utama sehingga sulit ditemukan kegiatan penangkapan kerang pada lokasi tersebut. Di Sungai Tallo, penangkapan kerang biasanya dilakukan pada spesies kerang air asin dan/atau payau di dekat muara. Pada penelitian ini, sampel kerang diambil dari lokasi Lakkang dan Muara Tallo dengan cara mengambil secara langsung dari substrat sedimen (*gleaning*). Lokasi pengambilan sampel biota di Sungai Tallo dan Jeneberang dapat dilihat pada Gambar 11.

Sampel ikan dan kerang yang ditangkap dari lokasi sampling kemudian dimasukkan ke dalam *coolbox* berisi es batu untuk kemudian dibawa ke Laboratorium Ekotoksikologi Laut UNHAS. Sampel biota kemudian dikelompokkan berdasarkan jenisnya dan kemudian diidentifikasi hingga tingkat spesies. Identifikasi spesies pada organisme kerang mengacu pada Carpenter & Niem (1998), sedangkan identifikasi spesies ikan mengacu pada Carpenter & Niem (1999), White et al. (2013) dan *database fishbase.org* (Froese et al. 2019). Sampel biota kemudian diukur panjang total dan bobot basahnya, serta diberikan label. Jika proses isolasi MP pada sampel tidak dilakukan pada hari yang sama, maka sampel disimpan pada lemari pendingin dengan suhu -20°C .



Gambar 11. Peta lokasi penangkapan sampel ikan dan kerang di Sungai Tallo dan Jeneberang

3. Metode isolasi dan identifikasi MP pada biota

Mikroplastik pada sampel biota diisolasi dari traktus digestivus ikan dan dari keseluruhan jaringan lunak kerang dengan menggunakan metode digesti basa menggunakan larutan potasium hidroksida (KOH) yang diadaptasi dari Foekema et al. (2013). Sampel ikan dibedah dengan cara melakukan sayatan dari lubang anus ke bagian atas operkulum, sehingga rongga perut ikan dapat terlihat. Traktus digestivus ikan kemudian diambil dengan melakukan pemotongan pada esofagus dan anus ikan. Traktus digestivus kemudian dimasukkan ke dalam botol spesimen dan ditambahkan larutan KOH 20% sebanyak $3\times$ dari volume sampel. Pada sampel kerang, keseluruhan

jaringan lunak kerang dipisahkan dari cangkang dan kemudian dimasukkan ke dalam botol spesimen dan ditambahkan KOH 20% dengan prosedur yang sama pada sampel ikan. Sampel kemudian dibiarkan pada suhu ruang ($\approx 27^{\circ}\text{C}$) selama 14 hari untuk menghancurkan material organik pada sampel. Metode digesti basa merupakan salah satu metode terbaik dalam isolasi MP dari sampel ikan dan avertebrata air (Lusher, et al. 2017b, Welden, et al. 2017). Pada penelitian ini konsentrasi KOH ditingkatkan menjadi 20% untuk meningkatkan efektivitas digesti. Peningkatan konsentrasi KOH hingga 20% diketahui tidak memberikan pengaruh pada *recovery rate* MP pada sampel dan juga tidak merusak morfologi MP (Munno et al. 2018).

Setelah melewati proses digesti basa, sampel kemudian dituang ke dalam cawan petri secara bertahap. Identifikasi MP dilakukan secara visual dengan menggunakan mikroskop stereo (Euromax SB-1902) pada pembesaran 45 \times . Mikroplastik yang ditemukan pada sampel kemudian dianalisis jumlah, warna, bentuk dan ukurannya. Mikroplastik kemudian diambil dan disimpan pada kaca objek untuk analisis lanjutan pembacaan jenis polimer. Klasifikasi bentuk MP mengacu pada panduan GESAMP (2019) (Lampiran 3). pengukuran panjang MP dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ImageJ (ver 1.52a), menggunakan fungsi *measure*. Penggolongan warna MP mengacu pada Frias et al. (2018). Sebanyak 20 MP representatif diidentifikasi jenis polimernya dengan menggunakan FTIR.

Penentuan jenis polimer MP dilakukan di lab Kimia FMIPA Unhas. Penentuan jenis polimer MP dilakukan dengan menggunakan alat FTIR (Shimadzu Prestice-21), dengan menggunakan metode kalium bromida (KBr). Kalium bromida digunakan karena sifatnya yang mampu menyerap banyak radiasi inframerah (Renner et al. 2017). Spektra polimer yang terbaca oleh alat kemudian dicocokkan dengan pustaka spektrum polimer yang disediakan secara terbuka di database spektrum Openspecy (Cowger et al. 2021)

4. Kontrol kontaminasi

Beberapa prosedur dilakukan untuk mencegah adanya kontaminasi pada sampel. Semua alat yang digunakan pada penelitian ini terlebih dahulu dibilas dengan menggunakan air keran sebanyak 3 kali dan pada bilasan keempat dibilas dengan menggunakan aquadest. Proses pembedahan setiap satu sampel biota dilakukan tidak lebih dari 5 menit. Sampel biota yang menunggu proses pembedahan diletakkan pada wadah tertutup Aluminum foil untuk mencegah adanya kontaminasi MP dari udara. Wilayah kerja pembedahan dan pengamatan visual MP terlebih dahulu dibersihkan dengan *roller dust* untuk mengurangi keberadaan kontaminasi.

Blanko sampel dibuat sebanyak 3 unit per 1 liter pembuatan KOH. Blanko sampel dibuat dengan memasukkan ± 30 ml larutan KOH 20% yang digunakan dalam proses

digesti basa ke dalam botol spesimen. Blanko kemudian diamati secara paralel dan dengan metode yang sama dengan pengamatan sampel.

Untuk mencegah adanya kontaminasi dari udara, maka dibuat kontrol negatif saat proses pengamatan visual MP pada sampel. Kontrol negatif dibuat dengan meletakkan 3 cawan petri berisi air murni dengan keadaan terbuka di sekitar mikroskop. Kontrol negatif dibuat 10 menit sebelum pengamatan visual MP dilakukan dan diamati 10 menit setelah pengamatan MP secara visual pada sampel selesai dilakukan.

5. Analisis Data

Data biota perairan (ikan dan kerang) disusun berdasarkan preferensi habitat dan kebiasaan makan. Penentuan kebiasaan makan pada ikan mengacu pada *database* fishbase.org (diakses 07 Februari 2020) dan divalidasi dengan sisa isi traktus digestivus ikan setelah perlakuan digesti basa dilakukan (McNeish et al. 2018) (Lampiran 5). Nilai kelimpahan MP dinyatakan dalam satuan MP/individu (Bessa et al. 2019) dan tingkat kontaminasi dinyatakan dalam persentase (%). Tingkat kontaminasi menunjukkan banyaknya individu yang terkontaminasi MP dibagi dengan jumlah total individu dalam satu spesies yang sama. Karena data kelimpahan MP yang diperoleh tidak memenuhi syarat normalitas dan homogenitas data, maka digunakan uji statistik non parametrik Kruskal-Wallis untuk mengetahui adanya perbedaan signifikan kelimpahan MP antar spesies. Uji Dunn digunakan untuk melihat spesies mana yang memiliki perbedaan kelimpahan MP. Perbedaan kelimpahan MP antar lokasi sungai dan antar ikan dengan kebiasaan makan berbeda diketahui dengan menggunakan uji non-parametrik Mann-whitney. Data warna, bentuk dan ukuran MP disajikan dalam grafik proporsi (%). Semua perhitungan statistik dan pembuatan grafik pada penelitian ini dilakukan dengan perangkat lunak GraphPad Prism 9.0.2.

C. Hasil

1. Kontrol kontaminasi

Dari 24 blanko sampel dan 69 kontrol negatif yang dibuat pada penelitian ini, tidak ditemukan adanya MP. Hal ini mengindikasikan bahwa kontaminasi tidak banyak berpengaruh pada hasil pengamatan MP pada sampel.

2. Kelimpahan MP pada sampel

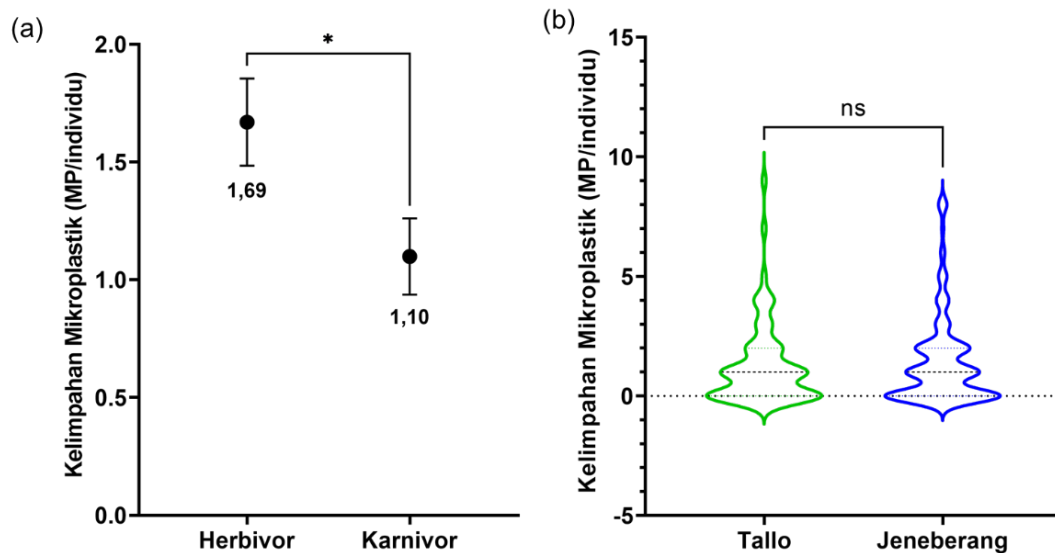
Sebanyak 228 individu biota perairan diambil dari Sungai Tallo dan Jeneberang. Sebanyak 140 ikan dan 22 kerang diambil dari Sungai Tallo dan 66 ikan diambil dari Sungai Jeneberang (Lampiran 6). Spesies dan karakteristik sampel biota dapat dilihat pada tabel 5. Sampel kerang yang ada pada penelitian ini tergolong ke dalam kebiasaan makan suspensivor. Sedangkan dari 206 individu ikan, Sebanyak 91 individu tergolong

ke dalam karnivor dan 115 individu tergolong ke dalam herbivor. Berdasarkan uji Mann-Whitney, terdapat perbedaan signifikan pada kelimpahan MP antar kebiasaan makan pada ikan, dengan ikan herbivor memiliki kelimpahan MP lebih tinggi dibandingkan dengan ikan karnivor ($P < 0,05$; Gambar 12.a). Berdasarkan lokasi penangkapan, tidak terdapat perbedaan kelimpahan MP pada ikan yang ditangkap dari Sungai Tallo dan Jeneberang ($P > 0,05$; Gambar 12.b). Hampir keseluruhan spesies yang ditemukan di lokasi studi memiliki tingkat kontaminasi MP lebih dari 50% dari jumlah sampel per spesies, kecuali pada ikan sepat rawa (*Trichopodus trichopterus*) dan ikan beloso (*Glossogobius aureus*) dengan tingkat kontaminasi 32,00% dan 42,86% secara berurutan (Tabel 5.).

Tabel 5. Karakteristik sampel biota yang diambil dari Sungai Tallo dan Jeneberang

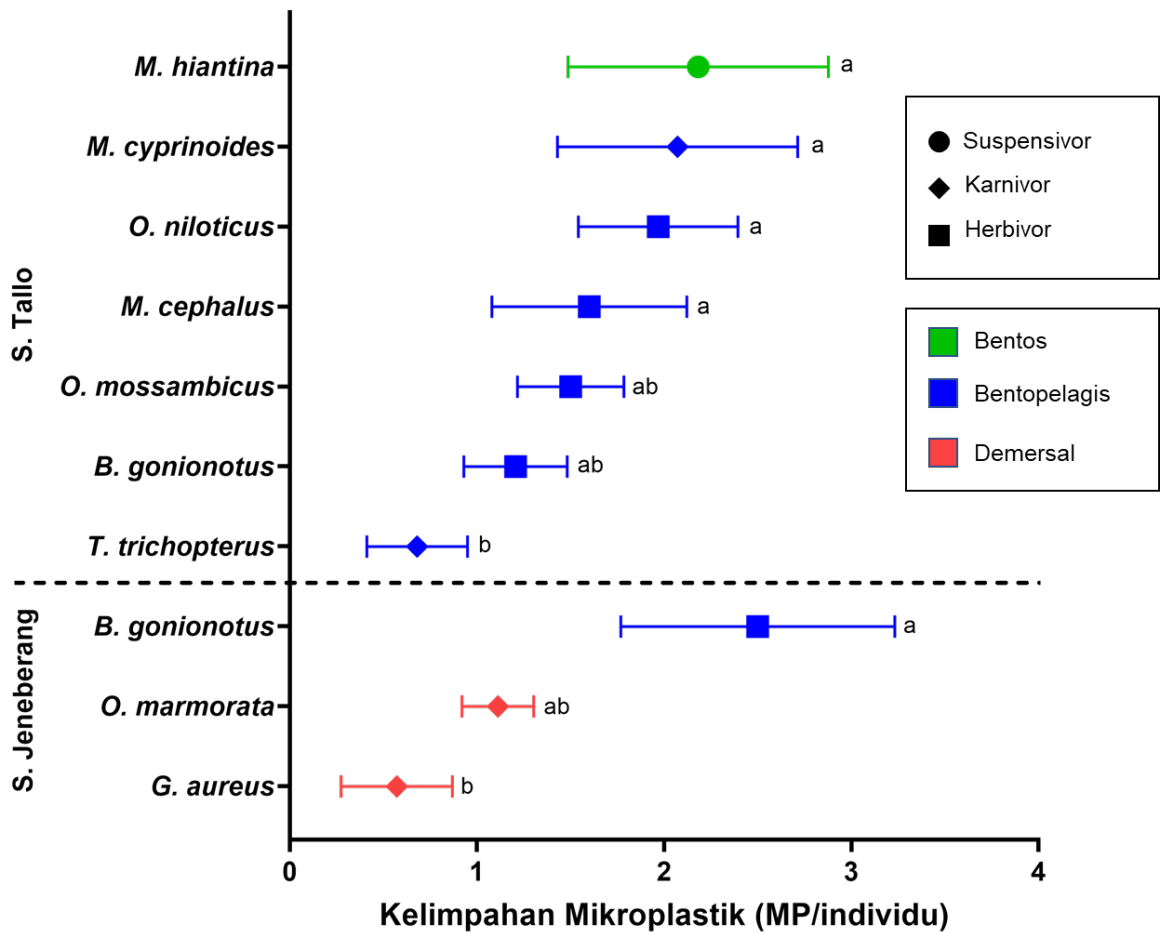
Spesies	n	Kebiasaan makan	Panjang \pm SE (kisaran)[cm]	Bobot \pm SE (kisaran)[g]	% kontaminasi
Sungai Tallo					
<i>M. hiantina</i> ^a	22	Suspensivor	4,54 \pm 0,158 (2,24 - 5,37)	24,88 \pm 1,808 (6,41 - 34,62)	72,73%
<i>M. cyprinoides</i>	14	Karnivor	26,19 \pm 0,62 (22,1 - 30,6)	160,53 \pm 10,96 (96,3 - 244,9)	71,43%
<i>O. niloticus</i>	31	Herbivor	19,07 \pm 0,70 (10,5-23,9)	166,81 \pm 16,10 (18,1-305)	70,97%
<i>M. cephalus</i>	10	Herbivor	12,75 \pm 0,53 (11,3-16,7)	19,44 \pm 1,66 (12,9-30,1)	80,00%
<i>O. mossambicus</i>	26	Herbivor	13,07 \pm 0,31 (11,3 - 16,4)	45,7 \pm 3,53 (26,5 - 91,1)	69,23%
<i>B. gonionotus</i>	34	Herbivor	17,11 \pm 0,29 (14,1 - 22,5)	67,72 \pm 5,15 (35 - 160,9)	55,88%
<i>T. trichopterus</i>	25	Karnivor	8,78 \pm 0,11 (7,7 - 10,1)	9,62 \pm 0,37 (6,4 - 12,3)	32,00%
Sungai jeneberang					
<i>B. gonionotus</i>	14	Herbivor	20,71 \pm 1,03 (12,3 - 27,9)	150,6 \pm 17,89 (46,7 - 312,9)	71,43%
<i>O. marmorata</i>	45	Karnivor	21,44 \pm 0,413 (15,9 - 27,9)	131,76 \pm 8,42 (50,6 - 310,2)	62,22%
<i>G. aureus</i>	7	Karnivor	16,23 \pm 0,97 (12,7 - 20,5)	30,83 \pm 5,09 (12,8 - 52,4)	42,86%

^aKelas Bivalvia, perhitungan bobot mengacu pada bobot total dengan cangkang.



Gambar 12 Kelimpahan MP berdasarkan kebiasaan makan ikan (a) dan diagram *violin* Kelimpahan MP pada ikan berdasarkan lokasi pengangkapan (b)

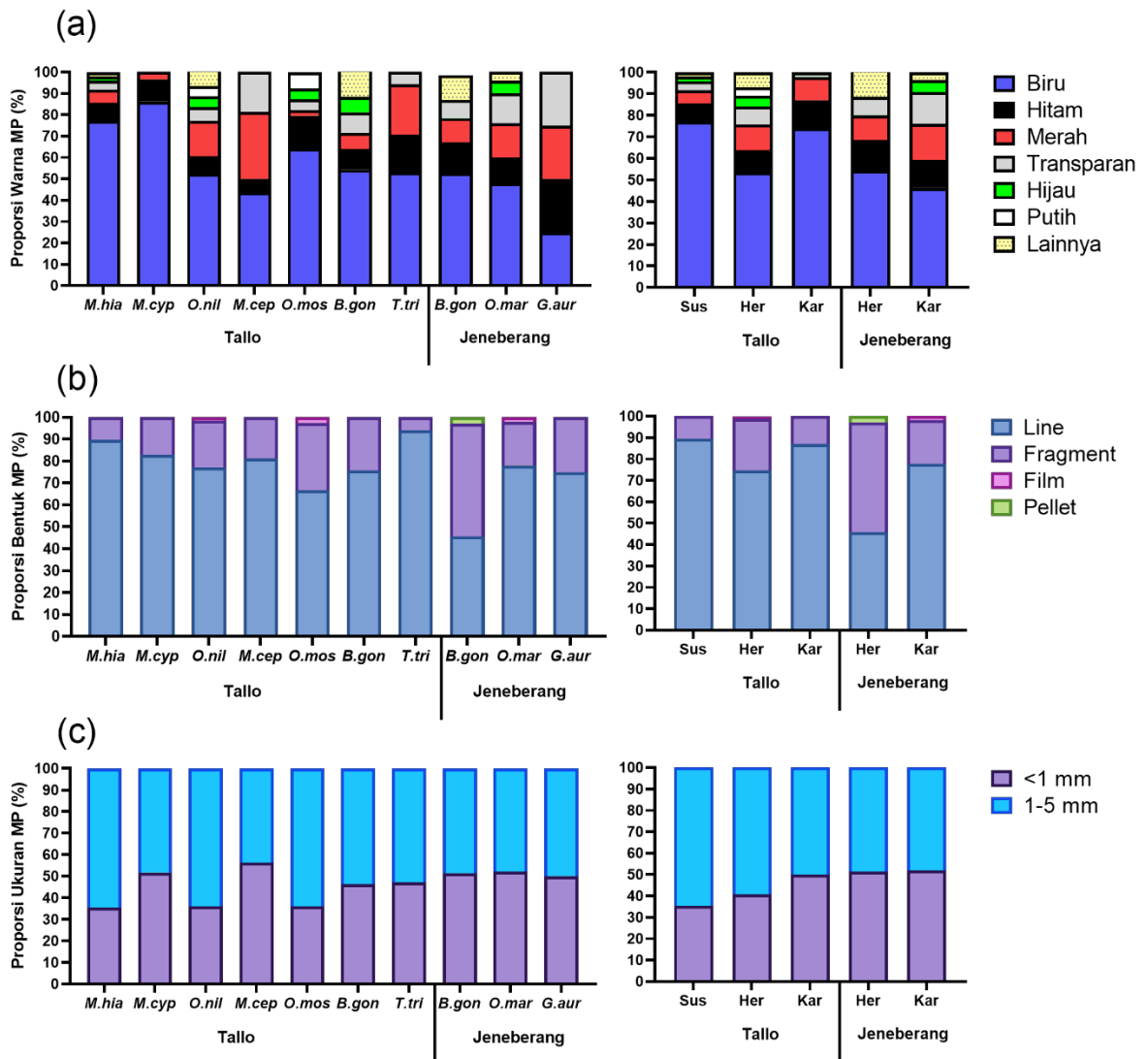
Kelimpahan MP pada kerang bakalang (*Marcia hiantina*) adalah sebesar $2,2 \pm 0,7$ MP/individu ($\bar{x} \pm SE$). *Marcia hiantina* merupakan satu-satunya spesies kerang yang dijadikan sampel pada penelitian ini, dan kerang ini hanya ditemukan pada muara Sungai Tallo pada musim kemarau dan tergolong ke dalam kerang air payau. Pada spesies ikan, secara umum terdapat perbedaan kelimpahan MP antar spesies berdasarkan uji Kruskal-Wallis ($P < 0,05$). Ikan bulan-bulan (*Megalops cyprinoides*), ikan nila (*Oreochromis niloticus*), ikan belanak (*Mugil cephalus*) dari Sungai Tallo dan ikan tawes (*Barbonymus gonionotus*) dari Sungai Jeneberang memiliki kelimpahan MP lebih tinggi dibandingkan dengan ikan sepat siam dan ikan beloso (Gambar 13). Kelimpahan MP pada spesies ikan di Sungai Tallo dimulai dari yang tertinggi adalah pada ikan bulan-bulan ($2,1 \pm 0,6$ MP/Individu), ikan nila ($2 \pm 0,4$ MP/individu), ikan belanak ($1,6 \pm 0,5$ MP/Individu), ikan mujair (*O. Mossambicus*; $1,5 \pm 0,3$ MP/individu), ikan tawes ($1,2 \pm 0,3$ MP/individu) dan ikan sepat rawa ($0,7 \pm 0,3$ MP/individu). Sementara itu di Sungai Jeneberang, spesies dengan kelimpahan MP tertinggi terdapat pada ikan tawes ($2,5 \pm 0,7$ MP/individu) kemudian diikuti oleh ikan betutu (*Oxyeleotris marmorata*; $1,1 \pm 0,2$ MP/individu) dan ikan beloso ($0,6 \pm 0,3$ MP/individu). Kelimpahan MP pada setiap spesies dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13 Kelimpahan MP pada sampel di Sungai Tallo dan Jeneberang berdasarkan spesies. Garis pada plot data menunjukkan \pm SE. Bentuk dan warna plot data secara berurutan mengindikasikan kebiasaan makan dan preferensi habitat. Huruf di sebelah plot data menunjukkan perbedaan signifikan kelimpahan MP berdasarkan Uji Kruskal-Wallis dengan uji lanjut Dunn ($P < 0,05$).

3. Profil warna, bentuk, ukuran dan polimer MP pada biota perairan di lokasi studi

Warna MP yang ditemukan pada biota perairan setidaknya dapat digolongkan ke dalam 6 warna utama. Warna yang paling dominan ditemukan pada organisme akuatik adalah warna biru (25,00-86,26%). Jika ditinjau dari kebiasaannya, maka MP warna biru cenderung lebih mendominasi pada organisme *suspensivor* dan karnivor yang berasal dari Sungai Tallo. Sedangkan di Sungai Jeneberang, proporsi MP warna biru antara ikan herbivor dan karnivor adalah 54,29% dan 46,30% secara berurutan. Selain warna biru, warna merah dan hitam merupakan warna yang secara konsisten hadir pada semua spesies yang diambil dari kedua sungai. Warna transparan juga hampir tersedia pada semua spesies dengan proporsi yang lebih kecil (4,17-25%), warna ini hanya tidak ditemukan pada MP yang ada di ikan bulan-bulan (*M. Cyprinoides*). Warna MP yang paling sedikit proporsinya ditemukan pada biota akuatik di lokasi studi adalah warna hijau (0 – 7,32%).



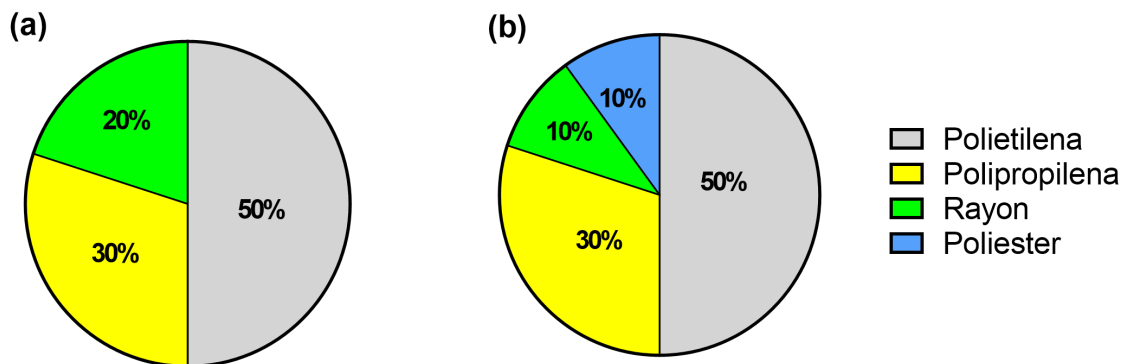
Gambar 14 Proporsi warna (a), bentuk (b) dan ukuran (c) MP yang ditemukan pada biota perairan di lokasi studi, pengelompokan dilakukan berdasarkan spesies (kiri) dan kebiasaan makan (kanan). Ket : Sus (Suspensivor), Her (Herbivor), Kar (Karnivor)

Bentuk MP yang ditemukan dari biota perairan di lokasi studi didominasi oleh bentuk *line* (44,74-94,12%). Proporsi bentuk MP terbanyak kedua adalah dari bentuk *fragment* (5,88-52,63%). Ikan tawes (*B. gonionotus*) dari Sungai Jeneberang cenderung mengingesti *fragment* lebih banyak dibandingkan dengan spesies lainnya. Ikan Herbivor cenderung memiliki proporsi *fragment* MP lebih banyak dibandingkan dengan ikan karnivor dan Suspensivor. Proporsi kecil dari MP bentuk film (1,64-2,56%) ditemukan pada traktus digestivus ikan dari kedua sungai. Sementara MP dari bentuk *pellet* hanya ditemukan dari ikan tawes (*B. gonionotus*) yang ditangkap di Sungai Jeneberang.

Berdasarkan ukurannya, MP yang ditemukan pada biota akuatik di Sungai Tallo dan Jenberang cenderung didominasi oleh MP berukuran besar (1-5mm; 43,75 – 64,58%). Secara umum, MP yang ditemukan pada spesies *M. hiantina*, *O. niloticus* dan *O. mossambicus* memiliki proporsi ukuran MP besar yang lebih tinggi dibandingkan

dengan spesies lainnya. Jika ditinjau berdasarkan kebiasaannya, ikan karnivor dan herbivor tidak memiliki perbedaan proporsi ukuran MP. Sedangkan di Sungai Tallo, ikan herbivor dan kerang memiliki proporsi MP besar yang sedikit lebih banyak dibandingkan dengan ikan karnivor.

Sebanyak 20 MP diambil secara acak dari sampel untuk dideteksi jenis polimernya. Polimer dari jenis polietilena memiliki proporsi yang paling besar pada biota di kedua sungai dengan masing-masing proporsinya mencapai 50%. Kemudian MP dari jenis polimer polipropilena menjadi yang terbanyak kedua dengan proporsi pada masing-masing lokasi sungai mencapai 30%. Mikroplastik dari jenis polimer rayon juga ditemukan pada biota di kedua sungai dengan proporsi di Sungai Tallo (20%) lebih tinggi dibandingkan dengan di Sungai Jeneberang (10%). Mikroplastik dari jenis polimer poliester hanya ditemukan di Sungai Jeneberang dengan proporsi sebesar 10%. Gambaran mengenai besaran proporsi MP pada biota perairan di Sungai Tallo dan Jeneberang dapat dilihat pada gambar 15.



Gambar 15. Proporsi polimer MP pada biota perairan di Sungai Tallo (a, n=10) dan Sungai Jeneberang (b, n=10)

D. Pembahasan

Keberadaan cemaran MP saat ini sudah dilaporkan di pesisir Kota Makassar, dan diduga berasal dari lokasi sungai (Afdal et al. 2019; Wicaksono et al. 2020). Mikroplastik yang ada pada lingkungan perairan bisa tersedia secara biologis pada organisme sehingga dapat berpindah dan masuk ke dalam biota perairan yang ada di lokasi tersebut. Mikroplastik dapat masuk ke dalam tubuh organisme perairan melalui dua mekanisme utama, yaitu *uptake* secara aktif dan pasif (Roch et al. 2020). *Uptake* MP secara aktif terjadi apabila organisme secara sengaja menelan MP dari lingkungan, biasanya hal ini terjadi karena organisme salah mengira MP sebagai makanan akibat tampilan MP yang menyerupai mangsa alaminya. Sedangkan *uptake* MP secara pasif terjadi apabila MP masuk ke dalam suatu organisme secara tidak sengaja, misalnya MP

terkonsumsi saat organisme sedang merumput, minum atau saat organisme predator mengonsumsi mangsa yang sudah sejak awal terkontaminasi oleh MP.

Pada penelitian ini, kerang bakalang yang diambil dari Sungai Tallo memiliki kelimpahan MP cukup tinggi jika dibandingkan dengan spesies ikan dari sungai yang sama. Kerang merupakan salah satu organisme *filter-feeder*. Secara umum kerang mengambil makanan dari bahan organik yang tersuspensi di air. Hal ini menjadikan kerang sangat rentan terhadap cemaran MP, mengingat MP cukup melimpah pada kompartemen air. Keberadaan MP pada kerang sudah pernah dilaporkan pada beberapa studi terdahulu. Misalnya saja kerang untuk kebutuhan konsumsi, *Mytilus galloprovincialis* yang berasal dari Laguna di utara Tunisia dilaporkan mengandung MP dengan kisaran kelimpahan 2,6-12 MP/individu (Wakkaf et al. 2020). Kemudian kerang asia (*Corbicula fluminea*) yang diambil dari lokasi muara Sungai Yangtze, China juga memiliki kelimpahan MP berkisar antara 0,4 – 5 MP/individu (Su et al. 2018). Kerang konsumsi yang dikoleksi dari Kabupaten Takalar yang berlokasi di Selatan Kota Makassar juga dilaporkan mengandung MP dengan kisaran kelimpahan rata-rata 6,7-14,6 MP/individu (El et al. 2020; Mawaddha et al. 2020).

Jika dibandingkan dengan penelitian-penelitian sebelumnya, kelimpahan MP pada kerang bakalang di Sungai Tallo masih tergolong rendah dengan rata-rata kelimpahan MP sebesar 2,2 MP/individu. Akan tetapi, tingkat kontaminasi MP pada kerang bakalang di Sungai Tallo tergolong cukup tinggi, dengan MP ditemukan pada lebih dari 70% total sampel kerang yang diamati. Dengan tingginya tingkat kontaminasi MP pada kerang yang ditangkap dari Muara Sungai Tallo, maka dapat memberikan potensi ancaman terhadap keamanan pangan, mengingat kerang bakalang merupakan komoditas perikanan konsumsi dengan *edible portion* yang mencapai 100%. Dengan tingginya kelimpahan MP pada organisme kerang di perairan, beberapa upaya dapat dilakukan untuk dapat setidaknya menurunkan tingkat cemaran MP pada kerang. Hal ini misalnya dapat dilakukan dengan cara melakukan proses depurasi kerang di air bersih mengalir. Penelitian Saputri et al. (2020) menunjukkan kerang *Asaphis detlorata* yang dipelihara pada air mengalir dapat menurunkan kelimpahan MP dengan tingkat efektivitas depurasi mencapai lebih dari 90% pada hari ke empat.

Walaupun MP pada kerang dapat memberikan ancaman bagi keamanan pangan, kerang dapat berguna jika digunakan sebagai organisme sentinel pada kasus pencemaran MP di perairan. Beberapa spesies kerang liar seperti *C. fluminea* terbukti memiliki profil MP yang sesuai dengan kelimpahan, kelas ukuran dan pola warna MP yang ada pada sedimen di lokasi hidupnya (Su et al. 2018). Secara umum kerang sering digunakan sebagai organisme sentinel pada kasus pencemaran perairan dikarenakan memiliki beberapa kriteria di antaranya: (1) tersedia secara luas dan melimpah pada

lingkungan perairan, (2) kondisi biologi dan fase hidup yang sudah diketahui, (3) cenderung menetap pada suatu lokasi dan jarang berpindah, (4) respon homogen terhadap polutan perairan dan (5) dampak cemaran yang mudah diamati dan sejalan dengan tingkat cemaran pada perairan, bahkan respon-nya dapat diamati melalui marka biologi sederhana (Goodsell et al. 2009; Li et al. 2019; Yaqin 2019). Kerang bakalang mungkin bisa menjadi salah satu kandidat organisme sentinel di lokasi Muara Sungai Tallo karena kelimpahan dan tingkat kontaminasinya secara umum lebih tinggi dibandingkan dengan spesies lain yang ditemukan di lokasi tersebut.

Selain kerang, ikan juga merupakan jenis organisme perairan yang sering dilaporkan mengingesti MP dari lingkungan perairan. Penelitian ini memberikan data awal mengenai profil pencemaran MP pada ikan konsumsi hasil tangkapan di Kawasan Sungai Tallo dan Jeneberang. Secara umum, faktor utama yang diduga dapat mempengaruhi kelimpahan MP pada ikan adalah kebiasaan makan ikan, tingkat trofik dan kelimpahan MP di lingkungan (Walkinshaw et al. 2020). Pada penelitian ini, tidak terdapat perbedaan signifikan antara kelimpahan MP pada ikan yang di tangkap di Sungai Tallo dan Sungai Jeneberang. Hal ini sesuai dengan pola kelimpahan MP di lingkungannya. Berdasarkan penelitian sebelumnya, Sungai Tallo dan Jeneberang tidak memiliki perbedaan kelimpahan MP secara signifikan baik pada kompartemen air maupun sedimen. Dengan kelimpahan MP antara kedua sungai yang cenderung sama, maka kelimpahan MP pada biota perairan antara kedua sungai juga cenderung tidak berbeda secara signifikan.

Pada penelitian ini, ikan herbivor cenderung memiliki kelimpahan MP lebih tinggi dibandingkan dengan ikan karnivor. Hal ini mungkin mengindikasikan adanya peran tanaman air dalam nasib MP di lingkungan perairan. Di lingkungan laut, tanaman air tingkat tinggi seperti lamun diketahui sebagai salah satu perantara MP untuk dapat dikonsumsi oleh organisme bentos dan ikan (Datu et al. 2019; Tahir et al. 2019, 2020). Di perairan tawar, beberapa studi juga menunjukkan fenomena yang serupa. Saat ini, MP diketahui dapat menempel pada akar dari beberapa tanaman air seperti *Lemna minor* dan *spirodela polyrhiza* (Kalčíková et al. 2017; Mateos-Cárdenas et al. 2019; Dovidat et al. 2020). Saat ini belum ada bukti ilmiah bahwa keberadaan MP dapat memberikan dampak buruk terhadap makrofita, akan tetapi akibat dari gaya elektrostatik, bentuk daun dan kehadiran perfiton, MP dapat dengan mudah untuk teradsorpsi di permukaan tanaman perairan (Kalčíková 2020). Kondisi ini membuat MP dapat lebih tersedia secara biologis, terutama pada ikan herbivor yang secara langsung mengonsumsi tanaman air.

Tanaman air yang umum ditemukan di Sungai Tallo dan Jeneberang adalah tanaman eceng gondok. Peningkatan populasi eceng gondok di lokasi studi terutama

terjadi di musim peralihan antara hujan menuju kemarau. Potongan dari tanaman ini juga ditemukan pada isi perut ikan di lokasi studi terutama pada ikan tawes (*B. gonionotus*). Ikan tawes dewasa diketahui memiliki kebiasaan makan herbivor, biasanya ikan ini mengonsumsi tumbuhan air seperti eceng gondok, rerumputan, kiambang dan *Hydrila* (Aida 2015; Herawati 2004). Eceng gondok sendiri merupakan tanaman air yang sangat cepat pertumbuhan dan perkembangannya di lokasi sungai tropis. Keberadaan eceng gondok diketahui dapat membentuk agregat dengan plastik yang ada di perairan sungai (Schreyers et al. 2021). Keberadaan akumulasi plastik pada tanaman air mungkin menjadi salah satu penyebab kecenderungan tingginya kelimpahan MP pada ikan herbivor di lokasi studi.

Ikan karnivor yang ada di lokasi studi memiliki kelimpahan MP yang cukup bervariasi. Ikan bulan-bulan (*M. cyprinoides*) misalnya, memiliki rata-rata kelimpahan MP yang lebih tinggi dibandingkan dengan ikan sepat rawa (*T. trichopterus*), betutu (*O. marmorata*) dan beloso (*G. aureus*). Hal ini mungkin dipengaruhi oleh strategi mencari makan dari ikan tersebut. Ikan bulan-bulan merupakan ikan benthopelagis yang cenderung memiliki akses lebih kepada permukaan air. Di lingkungan sungai, permukaan air cenderung memiliki kelimpahan MP yang lebih tinggi dibandingkan kolom air (Lestari et al. 2020). Strategi makan dari ikan bulan-bulan sebagai predator visual aktif juga memberikan peluang *uptake* MP baik secara aktif maupun pasif dari perairan, sehingga ikan ini menjadi lebih berpeluang untuk mengakumulasi MP dari lingkungan. Sementara itu, ikan beloso dan betutu merupakan ikan demersal. Spesies ini mencari makan dengan cara menunggu di liang, dan tidak bergerak hingga terdapat mangsa bergerak yang lewat di depannya, atau biasa dikenal sebagai *ambush predator* (Herawati 2004; Lim et al. 2020). Strategi pencarian makan secara pasif mungkin ikut berperan dalam rendahnya kelimpahan MP pada Ikan betutu dan beloso jika dibandingkan dengan ikan bulan-bulan.

Biota perairan yang ditangkap dari Sungai Tallo dan Jeneberang memiliki kecenderungan untuk mengonsumsi MP warna biru. Warna merupakan salah satu faktor penting yang dapat berkontribusi pada kemungkinan terasupnya MP oleh biota akuatik. Banyak spesies ikan mengandalkan indra visual dalam upaya mencari makan, yang sering kali menelan MP akibat tampilan visual yang mirip dengan makanan alaminya. Dalam skala laboratorium fenomena ini sudah pernah dilaporkan, seperti pada ikan gobi *Pomatoschistus microps* yang cenderung menelan MP polietilena warna putih dibandingkan warna hitam dan merah, hal ini terkait tampilan MP putih yang serupa dengan artemia sebagai pakan alami ikan tersebut (de Sá et al. 2015). Fenomena preferensi ikan terhadap warna MP tertentu juga teramati di alam. Sebagai contoh, ikan layang (*Decapterus muroadsi*) yang ditangkap di Pasifik Selatan memiliki

kecenderungan untuk mengonsumsi MP warna biru, hal ini dikarenakan warnanya serupa dengan copepoda yang ada di perairan tersebut sebagai makanan alami ikan layang (Ory et al. 2017).

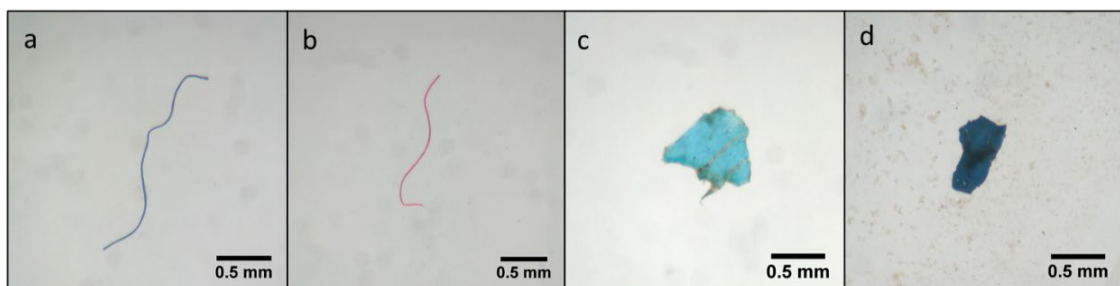
Sebagian besar ikan dapat membedakan warna di lingkungannya. Menurut Sudirman et al. (2011), di lingkungan perairan, penampakan warna secara visual sangat bergantung dengan serapan gelombang cahaya di air. Cahaya yang pertama kali diserap oleh air adalah warna merah. Cahaya merah biasanya akan habis diserap oleh air dan berubah menjadi energi panas pada kedalaman kurang dari 10 m. Hilangnya warna merah di perairan kemudian akan disusul oleh hilangnya warna oranye, kuning dan cahaya lainnya yang memiliki panjang gelombang yang cukup panjang. Sedangkan cahaya biru dan violet merupakan jenis cahaya yang memiliki daya tembus paling besar dibandingkan dengan jenis warna lainnya. Pada lingkungan akuatik di mana hilangnya spektrum gelombang cahaya kemerahan, maka partikel dengan warna kemerahan akan terlihat seperti warna gelap dan hitam (Land et al. 2011), yang mana warna gelap/hitam bukan merupakan warna yang disukai oleh ikan (Crawford & Quinn 2017).

Selain akibat preferensi ikan, warna MP yang dikonsumsi oleh ikan mungkin juga terkait dengan proporsi kelimpahan warna MP di perairan. Biru merupakan warna MP yang paling sering ditelan oleh beberapa spesies ikan di lingkungan estuari dan laut (Possatto et al. 2011; Lusher et al. 2016; Vendel et al. 2017; Ferreira et al. 2018). Hal ini mungkin merefleksikan besarnya proporsi kelimpahan MP warna biru di lingkungan perairan yang cukup banyak. Mikroplastik berwarna biru merupakan tipe MP yang paling banyak ditemukan pada lingkungan laut dan paling umum dikonsumsi oleh ikan (Dantas et al. 2020). Hal ini juga sesuai dengan kelimpahan MP yang umum ditemukan pada air dan sedimen di Sungai Tallo dan Jeneberang, dengan MP warna biru merupakan yang paling melimpah pada lokasi ini. Hal ini menjadikan MP dengan warna biru menjadi lebih berpeluang tertelan oleh biota perairan di Sungai Tallo dan Jeneberang.

Sebagai tambahan, warna MP pada umumnya berasal dari bahan aditif tambahan berupa pigmen warna. Beberapa pigmen pada industri plastik diketahui sering menambahkan logam sebagai salah satu bahan penyusunnya. Walaupun pewarna dengan penambahan logam sudah dilarang pada beberapa lokasi di Eropa, beberapa plastik berpigmen yang ditemukan di lingkungan perairan masih dilaporkan mengandung beberapa jenis logam (Imhof et al. 2016; Rodríguez-Seijo & Pereira 2017). Hal ini menjadikan MP berbagai warna berpeluang menjadi media transpor bahan toksik dari aditif pigmen ke lingkungan dan biota perairan (Rochman 2015).

Jika ditinjau dari bentuknya, MP yang banyak terdapat pada biota perairan di Sungai Tallo dan Jeneberang adalah dari jenis *line* dan *fragment*. Sama seperti pada warna MP, besarnya proporsi MP dari bentuk *line* dan *fragment* mungkin juga

merepresentasikan tingginya MP dalam bentuk ini di lingkungan perairan. Sungai Tallo dan Jeneberang berdasarkan tahapan penelitian sebelumnya juga menunjukkan besarnya kelimpahan MP bentuk *line* dan *fragment* yang diduga berasal dari sumber sekunder. Bentuk MP merupakan salah satu faktor penting dalam kesediaan biologis MP pada biota perairan. Tampilan MP yang menyerupai plankton menjadikannya mudah dikonsumsi oleh organisme perairan (Cole et al. 2011; Dris et al. 2015). Mikroplastik dengan bentuk *line* misalnya, secara visual menyerupai mikroalga berfilamen yang merupakan salah satu makanan alami ikan di perairan. Mikroplastik dengan bentuk *fragment* juga biasa menjadi preferensi ikan pemangsa visual karena bentuknya yang memiliki volume pada ketiga dimensinya jika dibandingkan MP bentuk lain (Wang et al. 2020). Beberapa organisme perairan trofik level rendah, yang biasanya bersifat *indiscriminate feeder*, cenderung mengonsumsi MP dengan profil yang serupa dengan yang ada pada lingkungannya. Beberapa spesies ikan yang ditangkap di Sungai Tallo dan Jeneberang, seperti *O. niloticus*, *O. mossambicus* dan *B. gonionotus* termasuk ke dalam *indiscriminate feeder* (Herawati 2004). Hal ini membuat ketiga spesies tersebut cenderung tidak selektif dalam mengonsumsi makanannya dan memungkinkan adanya variasi dalam karakteristik MP yang dikonsumsi. Dalam penelitian ini, variasi karakteristik MP yang dikonsumsi dapat diamati pada ikan *B.gonionotus* yang memiliki proporsi bentuk MP berbeda antara ikan yang tertangkap di Sungai Tallo dengan yang tertangkap di Sungai Jeneberang. Beberapa contoh bentuk MP yang ditemukan pada biota perairan di Sungai Tallo dan Jeneberang dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16 Representatif MP yang ditemukan pada sampel biota perairan. *Line* biru (a) dan merah (b); *Film* biru (c); *Fragment* biru (d)

Ukuran MP pada biota perairan di kedua sungai didominasi oleh MP ukuran besar (1-5 mm). Ukuran MP biasanya dapat dijadikan dugaan awal dari tingkat bahaya MP. Mikroplastik dengan ukuran kecil pada dasarnya akan lebih mudah untuk mengalami translokasi menuju jaringan biota. Pada mamalia, MP dengan ukuran kurang dari 20 μm dapat menembus pembuluh darah dan mengalami translokasi ke organ (Lusher et al. 2017a). Pada ikan nila (*O. niloticus*) yang dipaparkan polistiren 0,1 μm dapat menyebabkan akumulasi partikel plastik tersebut pada lambung, insang, hati dan otak ikan (Ding et al. 2018). Ikan *Carassius auratus* yang dipaparkan potongan *pellet*

dan *fragment* ukuran 2-4 mm dapat mengalami kerusakan rahang akibat aktivitas mengunyah, dan MP yang dipaparkan kemudian juga dimuntahkan dan tidak ter-uptake oleh ikan tersebut (Jabeen et al. 2018). Hal ini menunjukkan bahwa ukuran MP juga dapat mempengaruhi preferensi ikan terhadap MP. Mikroplastik ukuran besar yang banyak ditemukan pada biota air di Sungai Tallo dan Jeneberang sendiri, walaupun kecil kemungkinannya untuk ter-translokasi ke dalam organ, dapat memberikan bahayanya sendiri melalui keberadaan fisik MP, keberadaan monomer, zat aditif dan juga zat racun yang terabsorpsi pada MP tersebut (Cole et al. 2011; Rochman et al. 2013, 2014; Dris et al. 2015; Rochman 2015).

Polimer MP yang umum ditemukan pada biota perairan di Sungai Tallo dan Jeneberang adalah polietilena dan polipropilena. Kedua jenis polimer tersebut merupakan jenis polimer yang paling banyak diproduksi secara global (Geyer et al. 2017). Polimer dari jenis rayon juga ditemukan pada biota di kedua sungai. Rayon merupakan polimer dengan densitas tinggi ($1,50 \text{ g/cm}^3$), polimer ini biasa digunakan dalam keperluan tekstil dan cenderung mengendap di sedimen perairan (GESAMP 2019). Polimer poliester juga ditemukan pada biota di Sungai Jeneberang. Poliester biasa digunakan sebagai bahan baku tekstil, yang biasanya dapat terlepas ke perairan selama proses *laundry* (Napper & Thompson 2016). Keseluruhan polimer yang ditemukan pada biota perairan, juga ditemukan pada kompartemen air dan sedimen di kedua sungai. Hal ini dapat mengindikasikan bahwa MP yang ada pada biota perairan di lokasi studi kemungkinan besar berasal dari lingkungan Sungai Tallo dan Jeneberang.

Penelitian ini memberikan informasi awal mengenai cemaran MP pada biota konsumsi hasil tangkapan yang ada di Sungai-sungai Kota Makassar. Keberadaan MP yang ditemukan pada semua spesies pada penelitian ini perlu mendapatkan perhatian lebih mengingat hal ini dapat mengancam keamanan pangan pada masyarakat. Selain itu, Sungai Tallo dan Jeneberang juga sudah beberapa kali dilaporkan telah mengalami pencemaran, terutama pencemaran logam (Thamrin et al. 2018; Najamuddin et al. 2016; Werorilangi et al. 2019). Dengan keberadaan MP yang dapat menyebabkan *trojan horse effect*, yang mana polutan ini dapat berperan pada penyebaran organisme patogen dan peningkatan kesediaan biologis bahan pencemar lain dari lingkungan (Sendra et al. 2017, 2021; Trevisan et al. 2020), maka penelitian lanjutan terkait efek sinergetik MP dengan polutan lain terhadap biota perairan juga penting untuk dilakukan.

E. Kesimpulan dan Saran/Rekomendasi

Biota perairan hasil tangkapan (ikan dan kerang) di Sungai Tallo dan Jeneberang sudah terkontaminasi oleh MP. Ikan dengan kebiasaan makan herbivor memiliki kelimpahan MP lebih tinggi dibandingkan dengan karnivor. Karakteristik MP yang

ditemukan pada biota perairan memiliki kesamaan dengan MP yang ditemukan pada lingkungan (air dan sedimen) dari kedua sungai. Keberadaan MP pada biota perairan hasil tangkapan dari Sungai-sungai di Kota Makassar dapat mengancam keamanan pangan di masyarakat. Direkomendasikan untuk melakukan penelitian lanjutan terkait dampak buruk MP pada spesies ikan yang umum dikonsumsi oleh masyarakat.

IV. Uji Toksisitas Mikroplastik Polietilena pada Ikan Nila (*Oreochromis niloticus*) Ditinjau Dari Profil Sel Darah Putih dan Histopatologi Organ Usus dan Hati

Abstrak

Keberadaan Mikroplastik (MP) sudah ditemukan pada lingkungan Sungai Tallo dan Jeneberang, Indonesia. Mikroplastik juga diketahui sudah dapat terakumulasi pada ikan yang ada pada kedua sungai tersebut. Akan tetapi, dampak yang mungkin ditimbulkan oleh MP pada ikan masih belum banyak diketahui. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi dampak yang mungkin terjadi pada ikan akibat paparan MP dalam skala laboratorium. Uji toksisitas dilakukan pada ikan nila (*Oreochromis niloticus*) sebagai spesies representatif. Uji toksisitas dilakukan dengan tiga perlakuan utama yaitu kontrol, pemaparan MP melalui pakan (PMP), dan pemaparan MP+logam timbal melalui pakan (PMP+). Hasil penelitian menunjukkan bahwa ikan yang dipaparkan MP mengalami peningkatan jumlah sel darah putih dan peningkatan proporsi sel monosit. Keberadaan MP pada pakan juga dapat menyebabkan kerusakan jaringan berupa nekrosis, hemoragi dan peradangan pada usus ikan. Penambahan logam timbal pada MP dapat menyebabkan kerusakan jaringan tambahan berupa peningkatan *melanomacrophage centres* (MMC) dan nekrosis pada organ hati. Secara umum mikroplastik dapat berdampak pada Kesehatan ikan sehingga keberadaannya pada lingkungan perairan harus diminimalisir.

A. Pendahuluan

Mikroplastik (MP) saat ini sudah menjadi salah satu isu di bidang pencemaran perairan (Dris et al. 2015; Clark et al. 2016). Salah satu bahaya MP adalah toksisitasnya terhadap organisme akuatik. Mikroplastik, selain memiliki senyawa aditif yang beracun, dapat juga mengakumulasi polutan dari lingkungan sehingga dapat meningkatkan ketersediaan biologis dari polutan tersebut (Browne et al. 2007; Rochman 2015). Selain itu MP juga dapat menjadi vektor bagi patogen di perairan, menyebabkan MP berpeluang menyebarkan penyakit pada organisme perairan (Lamb et al. 2018; Li et al. 2020).

Ikan merupakan salah satu organisme memiliki risiko tinggi terdampak oleh cemaran MP. Pelaporan konsumsi MP oleh ikan sudah banyak dilaporkan baik pada lingkungan laut (Rochman et al. 2015; Tahir et al. 2020; Walkinshaw et al. 2020) maupun lingkungan perairan tawar (Jabeen et al. 2017; Silva-Cavalcanti et al. 2017; McNeish et al. 2018). Akan tetapi, studi mengenai dampak dari konsumsi MP terhadap ikan masih belum banyak terkaji. Sejauh ini, keberadaan MP pada perairan alam baru diketahui

dapat menyebabkan kerusakan jaringan pada organ dan penambahan konsentrasi MP pada saluran cerna (Garcia et al. 2020; Li et al. 2020). Sementara itu, penelitian lain terkait dampak MP pada ikan cenderung dilakukan dalam skala laboratorium.

Penelitian skala laboratorium terhadap dampak MP pada ikan sudah beberapa kali dilakukan. Sejauh ini MP diketahui dapat menyebabkan inflamasi, translokasi MP, gangguan sistem endokrin, gangguan metabolisme, stres, penurunan sintasan, dan kerusakan jaringan pada organ (Rochman et al. 2014; Choi et al. 2018; Ding et al. 2018; Jabeen et al. 2018; Xiong et al. 2018). Meski begitu, kajian dampak cemaran MP masih banyak memiliki kelemahan, hal ini terkait luasnya dimensi dari MP dengan ukuran, bentuk, jenis polimer dan juga keberadaan bahan aditif yang sangat bervariasi. Hal ini menjadikan uji toksisitas MP pada ikan masih memiliki banyak ruang untuk dikaji.

Pencemaran MP sudah banyak dilaporkan di berbagai lokasi, tidak terkecuali di Indonesia. Pada tahap penelitian sebelumnya, diketahui bahwa polutan MP juga sudah ditemukan pada Sungai Tallo dan Jeneberang, dan sudah terakumulasi pada ikan yang ada pada lokasi tersebut (Wicaksono et al. 2020; Wicaksono et al. 2021a; 2021b). Akan tetapi studi mengenai dampak MP pada spesies ikan yang umum dimanfaatkan dari kedua sungai tersebut masih belum pernah dilakukan. Padahal informasi ini cukup penting untuk memprakirakan risiko dari keberadaan MP pada Sungai Tallo dan Jeneberang.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi dampak dari pemberian MP terhadap ikan nila (*Oreochromis niloticus*) sebagai spesies representatif yang sering dimanfaatkan di Sungai Tallo dan Jeneberang. Penelitian ini juga memprakirakan dampak dari keberadaan polutan lain yang sering dilaporkan pada kedua sungai, yaitu cemaran logam timbal (Najamuddin et al. 2016; Thamrin et al. 2018; Werorilangi et al. 2019). Prakiraan dampak MP pada ikan dilakukan melalui uji toksisitas sub-kronis dengan melihat profil sel darah putih dan gambaran histopatologi organ usus dan hati sebagai respons dari ikan.

B. Metode Penelitian

1. Persetujuan komisi etik

Semua prosedur terkait dengan desain eksperimen, pemaparan bahan uji dan pengamatan respons hewan uji pada penelitian ini telah mendapatkan persetujuan dari komisi etik Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Hasanuddin terkait dengan etik penelitian dengan menggunakan subyek hewan. Persetujuan etik penelitian ini terdaftar dengan nomor protokol 3648/UN4.14.1/TP.02.02/2021.

2. Persiapan hewan uji

Hewan uji yang digunakan pada penelitian ini adalah ikan nila (*Oreochromis niloticus*) yang diperoleh dari pembudidaya ikan lokal (UD. Arif, Pangkep, Indonesia). Ikan nila sebanyak 250 ekor (umur pemeliharaan 2-4 minggu) dipindahkan dari lokasi pemeliharaan ke *Hatchery* Fakultas Perikanan dan Ilmu kelautan Universitas Hasanuddin. Setibanya di *hatchery*, ikan uji ditempatkan pada 1 wadah fiber (300 L) berisi air tawar ter-aerasi. Ikan diaklimatisasi pada wadah yang sama selama 7 hari. Setiap harinya air pada wadah pemeliharaan di-*siphon* dan diganti dengan air baru sebanyak $\pm 25\%$ total volume wadah. Selama proses aklimatisasi ikan diberikan pakan sekenyangnya (*ad satiation*) dengan frekuensi pemberian pakan 2 kali sehari, dilakukan pada pukul 08.00 (pagi) dan 16.00 (sore). Pakan yang digunakan selama proses aklimatisasi adalah pakan Preo 320 (PT. Matahari Sakti, Surabaya, Indonesia).

3. Persiapan bahan uji

Bahan uji yang digunakan pada penelitian ini adalah *fragment* MP polietilena (CV. Subur Kimia Jaya, Bandung, Indonesia). Pada penelitian ini, bahan uji akan dipaparkan kepada hewan uji melalui pakan (*dietary exposure*). Pemaparan pada hewan uji ini akan dilakukan pada 3 perlakuan berbeda, yaitu pakan kontrol (tidak mengandung MP), pakan yang ditambahkan *fragment* MP murni (PMP) dan pakan yang ditambahkan MP yang sebelumnya telah direndam dengan larutan logam timbal (PMP+). Metode penyisipan MP ke dalam pakan dilakukan dengan menggunakan metode *repelleting*.

Pakan ikan komersial Preo 320 (PT Matahari Sakti, Surabaya, Indonesia) terlebih dahulu ditepungkan dengan menggunakan mesin penggiling hingga menjadi bubuk. Pada perlakuan kontrol, pakan bubuk langsung dicetak kembali dengan mesin pencetak pakan menjadi *pellet* (1,5 mm). Pada perlakuan PMP, pakan bubuk terlebih dahulu ditambahkan dengan 10% W/W *fragment* polietilena MP, untuk kemudian dicetak kembali dalam bentuk pakan *pellet*.

Pada perlakuan PMP+, MP yang akan ditambahkan pada pakan terlebih dahulu direndam dengan larutan logam timbal. Perendaman larutan timbal dilakukan untuk menyimulasikan proses adsorpsi bahan toksik yang biasa ditemukan pada lingkungan perairan pada MP. Logam timbal pada penelitian ini dipilih karena merupakan polutan yang paling sering dilaporkan di lingkungan Sungai Tallo dan Jeneberang (Najamuddin et al. 2016; Thamrin et al. 2018; Werorilangi et al. 2019). Konsentrasi logam timbal yang dipakai dalam proses perendaman adalah sebesar 2 ppm, konsentrasi ini serupa dengan konsentrasi logam timbal tertinggi pada air yang pernah di laporkan di Sungai Jeneberang yaitu sebesar 1,7 ppm (Thamrin et al. 2018). Perendaman MP dilakukan dengan memasukkan 100 g MP ke dalam tas kain, kemudian dimasukkan ke dalam

stoples kaca (5 L) berisi larutan timbal pada konsentrasi 2 ppm. Perendaman MP dilakukan selama 3 hari, dan tiap harinya dilakukan pengadukan pada media perendaman pada pukul 08.00; 12.00 dan 16.00. Setelah proses perendaman selesai dilakukan, MP diangkat dan dibiarkan kering pada suhu ruang. Mikroplastik kemudian ditambahkan ke dalam pakan dengan prosedur yang sama seperti pada perlakuan PMP.

Sebelum eksperimen dimulai, dilakukan pengukuran konsentrasi logam timbal pada pakan yang akan digunakan pada setiap perlakuan. Pengukuran logam timbal dilakukan pada pakan setiap perlakuan dengan 3× pengulangan. Pengukuran kadar logam timbal dilakukan di Dinas Kesehatan Provinsi Sulawesi Selatan dengan menggunakan metode *atomic absorption spectroscopy* (AAS). Pengukuran kadar logam timbal pada pakan dilakukan untuk mengetahui apakah logam timbal yang ditambahkan pada perendaman MP memang telah teradsorpsi pada MP yang digunakan pada perlakuan PMP+.

4. Desain Eksperimen

Keseluruhan proses eksperimen dilakukan di Hatchery Fakultas Ilmu Kelautan dan Perikanan Universitas Hasanuddin. Penelitian dilakukan dengan desain rancangan acak lengkap (RAL) yang terdiri dari 3 perlakuan dan 5 ulangan, sehingga secara total terdapat 15 unit percobaan. Perlakuan pada penelitian ini adalah kontrol (pemberian pakan tanpa MP), PMP (Pemberian pakan yang ditambahkan 10% W/W *pristine* MP) dan PMP+ (Pemberian pakan yang ditambahkan 10% W/W MP yang terlebih dahulu direndam larutan logam timbal). Eksperimen dilakukan selama 28 hari.

Wadah unit percobaan yang digunakan pada penelitian ini adalah akuarium dengan volume ±42 L (30 x 40 x 35 cm). pada setiap akuarium, terdapat ruang filtrasi yang terisi dakron dan *bioball* sebagai filter mekanik dan biologis secara berurutan. Pemindahan air dari ruang utama akuarium ke ruang filter dilakukan dengan menggunakan pompa akuarium (Yamano 1200, kekuatan pompa 700 L/jam). Setiap unit percobaan diaerasi untuk meningkatkan oksigen terlarut. Setiap harinya, akuarium dibersihkan dan airnya di-*siphon* dan diganti sebanyak ±20%. Pada hari ke 7, 14 dan 21 dilakukan penggantian air sebanyak 80% dan juga penggantian filter mekanik. Wadah akuarium unit percobaan dapat dilihat pada gambar 17.



Gambar 17. Bentuk dan penyusunan akuarium unit percobaan

Sebanyak 150 ekor ikan (bobot rata-rata $14,70 \pm 3,20$ g; panjang rata-rata $9,55 \pm 0,70$ cm) didistribusikan secara acak ke 15 akuarium (10 individu/akuarium). Pakan ikan (kontrol, PMP dan PMP+) diberikan sebanyak 5% bobot tubuh ikan per harinya, dengan frekuensi pemberian pakan diberikan sebanyak 2 kali per hari. Pemberian pakan dilakukan pada pukul 08.00-09.00 (pagi) dan 16.00-17.00 (sore). Pada saat proses pemberian pakan, aerasi dan pompa dimatikan terlebih dahulu dan dibiarkan hingga pakan dikonsumsi oleh ikan ($\pm 10-20$ menit). Jika terdapat sisa pakan pada unit percobaan, maka sisa pakan tersebut dibersihkan dengan cara di-*siphon*. Pada hari ke 7, 14 dan 21 dilakukan pengukuran bobot ikan per unit percobaan untuk menyesuaikan jumlah pakan yang harus diberikan.

5. Pengambilan darah dan pembuatan sediaan apus darah

Prosedur pengambilan darah dan pembuatan sediaan apus darah diadaptasi dari Blaxhall & Daisley (1973). Pengambilan darah dan pembuatan sediaan apus darah dilakukan pada ikan stok sebelum eksperimen dimulai (hari ke-0) dan dilakukan pada setiap perlakuan di akhir eksperimen (hari ke-28). Pada ikan stok, sel darah diambil dari lima ikan secara acak. Ikan yang diambil darah terlebih dahulu dimasukkan ke dalam wadah kaca untuk proses pembiusan. Proses pembiusan dilakukan dengan menggunakan minyak cengkeh yang ditambahkan air dari media pemeliharaan dengan konsentrasi 1 ml/L. ikan dibiarkan berada dalam wadah pembiusan selama ± 5 menit

hingga terdapat tanda-tanda seperti kehilangan daya renang, perlambatan buka tutup operkulum, disorientasi dan kehilangan respons fisik.

Ikan yang sudah terbius kemudian diambil darahnya dengan menggunakan spuit (1 ml) melalui vena caudalis. Setelah jarum spuit ditusukkan pada vena caudalis, *plunger* pada spuit kemudian ditarik hingga darah masuk ke ruang *barrel*. Darah kemudian dipindahkan ke dalam *vacuum tube* yang telah terlebih dahulu diberikan anti-koagulan untuk mencegah penggumpalan darah.

Untuk perhitungan jumlah sel darah putih, darah yang diambil dari ikan kemudian dihisap dengan menggunakan pipet thoma hingga mencapai batas skala 0,5. Kemudian dengan menggunakan pipet yang sama, kembali dihisap larutan turk hingga volume campuran mencapai batas skala 11. Hasil campuran darah dan larutan turk pada pipet thoma tersebut kemudian dikocok dengan membentuk gerakan seperti angka 8 selama 3-5 menit untuk memastikan keduanya tercampur sempurna. Hasil campuran darah dan larutan turk kemudian diteteskan ke *hemocytometer* dan ditutup dengan menggunakan *cover glass*. *Hemocytometer* kemudian diamati dengan menggunakan mikroskop cahaya. Pada *hemocytometer*, sel leukosit dapat terlihat pada ruang/kotak hitung yang terdiri dari 25 bidang (5 x 5 bidang). Jumlah sel darah putih dihitung pada setiap bidang hitung dan dicatat.

Untuk mengetahui proporsi jenis sel darah putih (diferensiasi darah), maka perlu dibuat sediaan apus darah. Sediaan apus darah dibuat dengan menempatkan dua ujung gelas objek pada sudut 45°, dan meneteskan sampel darah pada titik sudut dari gelas objek tersebut. Kemudian gelas objek ditarik untuk berpindah ke sisi lainnya, sehingga darah tersapu secara merata dan membentuk lapisan darah tipis pada gelas objek. Hasil apusan tersebut kemudian dikering anginkan dan direndam larutan metanol selama 5 menit, kemudian dilanjutkan dengan perendaman larutan pewarna giemsa selama 20 menit, dan diakhiri dengan pembilasan air mengalir selama 5 menit. Preparat apusan darah kemudian dikeringkan dan diamati dengan menggunakan mikroskop cahaya. Pengamatan dilakukan berfokus pada jenis-jenis sel darah putih yang berbeda. Pada setiap apusan, diamati 100 sel darah putih, dan dihitung proporsi jumlah sel darah putih berbeda dari keseluruhan sel yang diamati per-preparat apusan darah.

6. Pembuatan preparat jaringan (parameter histopatologi)

Pembuatan preparat jaringan dilakukan pada organ usus dan hati ikan. Organ usus dipilih karena merupakan organ utama yang terpapar langsung oleh MP, sedangkan organ hati dipilih karena merupakan salah satu organ yang berfungsi untuk regulasi polutan yang masuk ke dalam tubuh. Organ hati dan usus yang digunakan untuk membuat preparat jaringan diambil dari perwakilan tiap unit percobaan. Proses

pembedahan ikan untuk pengambilan organ dilakukan pada hari ke 29, setelah ikan dipuasakan selama 24 jam sejak proses pemaparan bahan uji selesai dilakukan.

Sebelum dilakukan proses pembedahan, terlebih dahulu ikan dibius dengan menggunakan suhu dingin (menggunakan es batu). Ikan yang sudah menunjukkan ciri-ciri berupa kehilangan daya renang, perlambatan buka tutup operkulum dan hilangnya respons fisik kemudian diambil dan dibedah. Pembedahan dilakukan dengan melakukan sayatan dari anus ikan menuju ke bagian atas operkulum, hingga rongga perut dapat terlihat. Kemudian dilakukan pemotongan pada esofagus ikan dan anus, untuk mendapatkan keseluruhan traktus digestivus ikan. Organ hati juga diambil dengan cara melakukan pemotongan bagian organ hati yang bermuara ke saluran pencernaan. Sampel traktus digestivus dan organ hati kemudian di preservasi dengan cara dimasukkan ke dalam botol berisi larutan fosfat buffer-formalin 10% hingga keseluruhan organ terendam. Sampel yang telah di preservasi kemudian dibawa ke Klinik Hewan Universitas Hasanuddin untuk proses lanjutan pembuatan preparat jaringan.

Pembuatan preparat jaringan secara umum terdiri dari 6 tahap utama yaitu pemotongan (*dissection*), dehidrasi, penjernihan (*clearing*), pembuatan blok parafin (*embedding*), pemotongan *slide* (*cutting*) dan pewarnaan (*staining*). Proses pemotongan (*dissection*) dilakukan untuk memilah bagian organ yang akan dibuat preparat jaringan, biasanya diiringi dengan pemotongan blok organ (1x1 cm). Akan tetapi karena organ usus dan hati ikan pada penelitian ini sudah berada pada ukuran yang kecil, maka tahapan ini bisa dilewati dan langsung masuk ke proses dehidrasi. Pada proses dehidrasi, organ usus dan hati direndam dengan menggunakan larutan alkohol konsentrasi bertingkat. Perendaman dilakukan dari konsentrasi alkohol 70%, 80%, 90% dan 95% dengan durasi perendaman pada masing-masing konsentrasi selama 24 jam. Kemudian proses dehidrasi diakhiri dengan perendaman dengan alkohol absolut selama 1 jam.

Proses dehidrasi kemudian dilanjutkan dengan proses penjernihan (*clearing*). Pada tahapan ini organ direndam larutan xylol dengan durasi 30 menit, dan dilanjutkan dengan perendaman di larutan parafin + xylol selama 1 jam. Setelah melalui proses *clearing*, sampel kemudian dicetak dalam blok parafin (*embedding*). Sampel kemudian memasuki tahapan proses pemotongan blok (*cutting*), proses ini dilakukan dengan menggunakan alat mikrotom. Pada proses *cutting*, sampel organ yang ada pada blok parafin dipotong hingga mencapai ketebalan 3-5 μm yang kemudian diregangkan di dalam *water bath* dan ditempelkan ke gelas objek. Selanjutnya sampel diwarnai dengan menggunakan metode pewarnaan Hematoxyline & eosine (HE). Sampel jaringan kemudian diberikan entelan dan ditutup *cover glass*. Preparat jaringan kemudian diamati

dengan menggunakan mikroskop untuk melihat adanya perubahan/kerusakan jaringan yang ada pada organ.

7. Analisis Data

Data yang dianalisis pada penelitian ini meliputi nilai sintasan, laju pertumbuhan spesifik, jumlah sel darah putih, diferensiasi sel darah putih dan skoring kerusakan jaringan (histopatologi) pada hewan uji. Nilai sintasan dihitung dengan membagi jumlah ikan yang hidup pada akhir pemeliharaan pada setiap unit percobaan dengan jumlah ikan pada awal pemeliharaan, kemudian dilaporkan dalam bentuk persentase (%). Laju pertumbuhan spesifik diukur dari setiap perlakuan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\text{Laju pertumbuhan spesifik } \left(\frac{\%}{\text{hari}}\right) = 100 \times \frac{(\ln W_e - \ln W_s)}{\text{Lama pemeliharaan (hari)}}$$

Dengan keterangan “ln” sebagai logaritma natural, W_e dan W_s sebagai bobot ikan pada awal dan akhir penelitian.

Jumlah sel darah putih pada ikan dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Jumlah sel darah putih } \left(\frac{\text{sel}}{\text{ml}}\right) = \frac{\text{Rata - rata jumlah sel pada setiap kotak}}{\text{volume kotak pengamatan}} \times \text{Jumlah kotak pengamatan}$$

Jumlah sel darah putih dilaporkan dalam satuan sel/ml. Kotak pengamatan yang dimaksud adalah kotak bidang pengamatan yang ada pada hemocytometer dengan volume 0,004 mm³. Diferensiasi sel darah putih yang dianalisis pada penelitian ini adalah proporsi dari setiap jenis sel darah putih (limfosit, monosit, neutrofil, basofil dan eosinofil) yang ada pada apusan darah. Proporsi setiap jenis sel darah putih disajikan dalam persentase (%).

Kerusakan jaringan histopatologi yang ada pada preparat jaringan masih bersifat kualitatif. Untuk mengubah ke dalam bentuk kuantitatif maka dilakukan metode skoring untuk menghitung indeks organ dan indeks total dari kerusakan jaringan yang terjadi pada organ (Bernet et al. 1999). Dalam aplikasinya, kerusakan jaringan yang terjadi pada organ dikelompokkan berdasarkan tingkat “kepentingan” suatu kerusakan jaringan (*important factors*). *Important factors* memiliki bobot skor dengan kisaran 1-3 dengan ketentuan skor 1 mengindikasikan kerusakan ringan dan dapat kembali pada kondisi semula dengan cepat jika penyebab kerusakan dihilangkan, skor 2 mengindikasikan kerusakan moderat dan jaringan dapat kembali pada kondisi semula pada kebanyakan kasus jika penyebab kerusakan jaringan dihilangkan dan skor 3 mengindikasikan kerusakan parah dan jaringan tidak dapat kembali ke kondisi semula. Kemudian frekuensi kejadian setiap kerusakan jaringan pada preparat juga diberikan bobot skor berkisar 1-6 (*Score value*) dengan ketentuan semakin rendah nilai skor, maka frekuensi kerusakan jaringan semakin sedikit dan semakin tinggi skornya maka kerusakan

jaringan semakin banyak/berat. Nilai indeks organ dapat diperoleh dengan penjumlahan hasil kali dari *important factors* dan *score value* dari setiap kerusakan yang ditemukan pada organ. Sedangkan nilai total indeks diperoleh dari penjumlahan seluruh indeks organ yang diamati pada setiap individu ikan, dalam penelitian ini adalah penjumlahan indeks organ usus dan indeks organ hati.

Nilai sintasan, jumlah sel darah putih dan diferensiasi sel darah dianalisis dengan menggunakan uji ANOVA dan diikuti dengan uji lanjutan Tukey. Jika terdapat data yang tidak memenuhi syarat distribusi normal dan homogenitas data bahkan setelah transformasi data dilakukan, maka pengujian dilakukan dengan uji non-parametrik Kruskal-Wallis yang dilanjutkan dengan uji lanjutan Dunn. Kerusakan jaringan secara kualitatif disajikan dalam bentuk gambar untuk menunjukkan bentuk-bentuk kerusakan jaringan yang terjadi pada setiap organ (usus dan hati) pada setiap perlakuan. Dikarenakan tidak ditemukan adanya kerusakan jaringan pada organ usus dan hati pada perlakuan kontrol, maka skor kerusakan jaringan secara kuantitatif dianalisis dengan menggunakan uji-t dan/atau uji Mann-Whitney untuk membandingkan indeks organ dan indeks total kerusakan histopatologi antara perlakuan PMP dan PMP+.

C. Hasil

1. Kandungan logam timbal pada bahan uji

Pada penelitian ini, logam timbal tidak ditambahkan secara langsung pada bahan uji (pakan). Logam timbal dimasukkan ke dalam bahan uji melalui perantara MP (melalui proses perendaman). Sehingga untuk memastikan apakah terdapat kandungan logam timbal pada bahan uji, masih perlu dilakukan pengukuran konsentrasi logam timbal pada pakan yang diberikan kepada hewan uji selama perlakuan. Hasil pengukuran menunjukkan pakan ikan yang digunakan pada perlakuan PMP+ ($0,26 \pm 0,051$ mg/kg) dan kontrol ($0,11 \pm 0,070$ mg/kg) memiliki kandungan rata-rata logam timbal lebih tinggi jika dibandingkan dengan perlakuan PMP ($0,08 \pm 0,077$ mg/kg) berdasarkan uji ANOVA yang dilanjutkan dengan uji Tukey ($P < 0,05$) (Tabel 6).

2. Sintasan dan laju pertumbuhan spesifik

Nilai sintasan antar perlakuan berbeda secara signifikan berdasarkan uji ANOVA ($P < 0,05$). Nilai sintasan pada perlakuan kontrol ($90 \pm 7,07\%$) secara signifikan lebih tinggi jika dibandingkan dengan perlakuan PMP ($52 \pm 14,83\%$) dan PMP+ ($48 \pm 19,24\%$) (Tabel 6). Sedangkan nilai sintasan antara perlakuan PMP dan PMP+ tidak signifikan berbeda ($P > 0,05$).

Berdasarkan laju pertumbuhan spesifik, perlakuan kontrol secara umum memiliki nilai laju pertumbuhan yang paling tinggi ($3,25 \pm 0,38\%$) jika dibandingkan dengan

perlakuan PMP ($2,59 \pm 0,66\%$) dan PMP+ ($2,54 \pm 0,24\%$). Sehingga pertumbuhan ikan perlakuan kontrol lebih tinggi dibandingkan dengan dua perlakuan lainnya.

Tabel 6. Kandungan logam timbal pada pakan, sintasan, laju pertumbuhan spesifik dan gambaran sel darah putih pada setiap perlakuan. PMP : Pakan dengan mikroplastik; PMP+ : pakan dengan mikroplastik yang telah direndam larutan timbal.

	Stok (hari ke-0)	Kontrol	PMP	PMP+
Kandungan logam timbal pada pakan (mg/kg)	-	$0,11 \pm 0,070^{ab}$	$0,08 \pm 0,077^a$	$0,26 \pm 0,051^b$
Sintasan (%)	-	$90 \pm 7,07^a$	$52 \pm 14,83^b$	$48 \pm 19,24^b$
Laju pertumbuhan spesifik (%)	-	$3,25 \pm 0,38^a$	$2,59 \pm 0,66^b$	$2,54 \pm 0,24^b$
Gambaran sel darah putih				
Jumlah sel darah putih ($\times 10^6$ sel/ml)	$36,50 \pm 9,20^a$	$31,00 \pm 5,18^a$	$44,00 \pm 13,69^a$	$82,26 \pm 19,00^b$
Limfosit (%)	$53,00 \pm 3,87^a$	$54,40 \pm 2,07^a$	$43,20 \pm 2,78^b$	$36,40 \pm 2,79^c$
Monosit (%)	$19,80 \pm 3,96^a$	$19,80 \pm 2,58^a$	$32,60 \pm 4,88^b$	$44,00 \pm 2,74^c$
Neutrofil (%)	$7,00 \pm 0,71^a$	$6,60 \pm 1,52^a$	$7,40 \pm 2,07^a$	$5,40 \pm 1,14^a$
Basofil (%)	$11,60 \pm 1,34^a$	$12,40 \pm 2,51^a$	$10,20 \pm 2,17^a$	$8,20 \pm 1,92^a$
Eosinofil (%)	$8,60 \pm 0,89^a$	$6,80 \pm 1,64^a$	$8,40 \pm 1,16^a$	$6,00 \pm 1,41^a$

Perbedaan huruf *superscript* pada baris yang sama menunjukkan perbedaan secara statistik berdasarkan uji ANOVA atau Kruskal Wallis ($P < 0,05$) antar perlakuan.

3. Gambaran sel darah putih

Berdasarkan jumlah sel darah putih, tidak terdapat perbedaan signifikan pada perlakuan ikan stok ($36,50 \pm 9,20 \times 10^6$ sel/ml), kontrol ($31,00 \pm 5,18 \times 10^6$ sel/ml) dan PMP ($44,00 \pm 13,69 \times 10^6$ sel/ml). Sedangkan pada perlakuan PMP+ jumlah sel darah putih secara signifikan lebih tinggi dibandingkan perlakuan lainnya ($82,26 \pm 19,00 \times 10^6$ sel/ml).

Berdasarkan diferensiasi sel darah putih, tidak terdapat perbedaan signifikan antara proporsi sel darah putih pada stok (hari-0) dengan kontrol, sehingga keduanya dapat dijadikan acuan proporsi diferensiasi sel darah putih dalam keadaan ikan normal. pada keadaan normal (stok dan kontrol) sel darah putih cenderung didominasi oleh sel limfosit (53-54%), diikuti oleh sel monosit (19,80%), basofil (11,6 – 12,4%), eosinofil (6,8

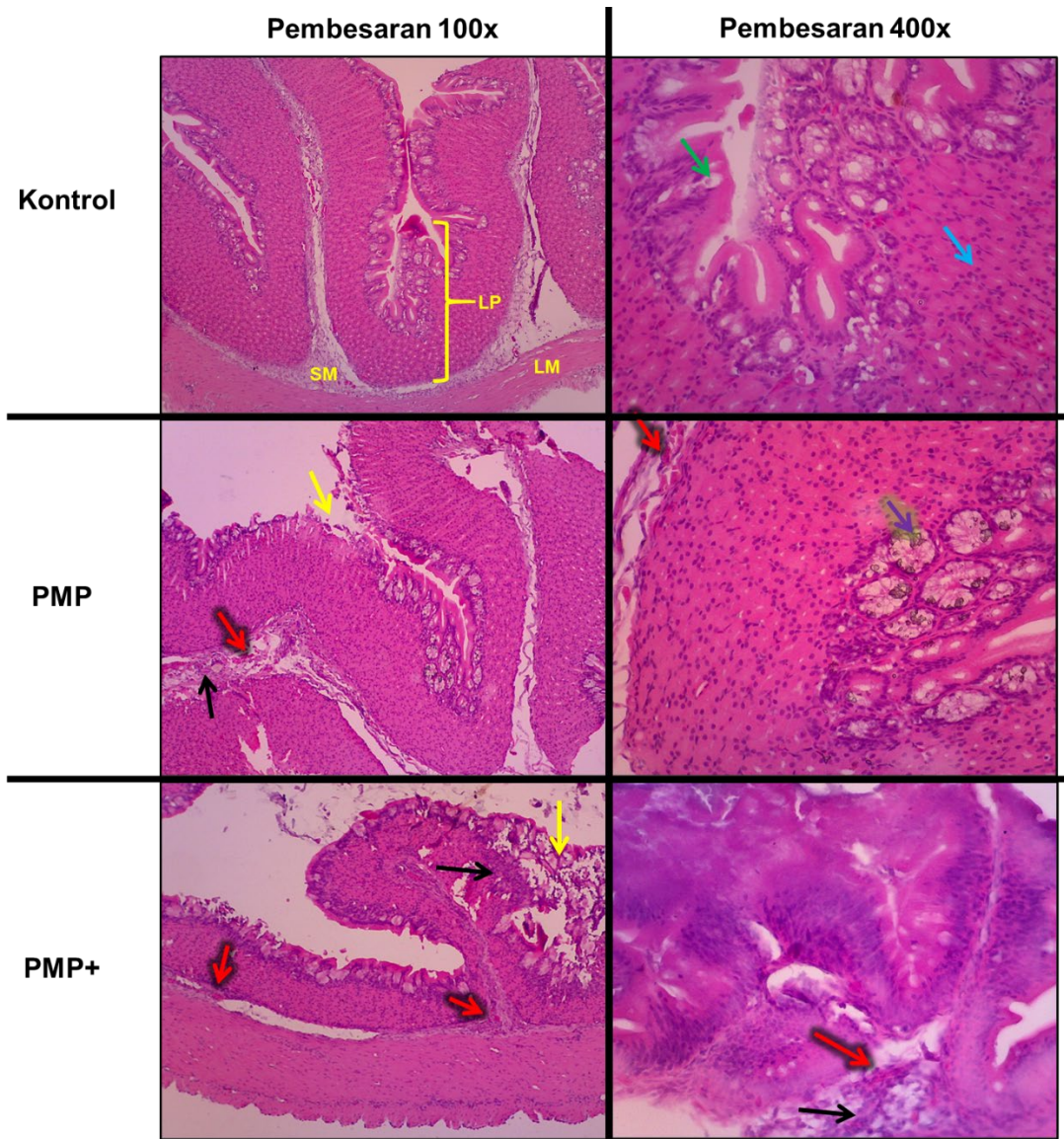
– 8,6%) dan neutrofil (6,60 - 7%). Pada perlakuan paparan MP, terdapat penurunan signifikan proporsi rata-rata sel limfosit menjadi 43,20% dan 36,40% pada perlakuan PMP dan PMP+ secara berurutan. Sedangkan proporsi rata-rata sel monosit mengalami peningkatan signifikan menjadi 32,60% dan 44,00% pada perlakuan PMP dan PMP+ secara berurutan. Sedangkan proporsi rata-rata jenis darah putih lainnya (neutrofil, basofil dan eosinofil) secara umum tidak mengalami perubahan antar perlakuan. Gambaran diferensiasi sel darah putih pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 6.

4. Gambaran histopatologi pada organ usus dan hati ikan

Berdasarkan penampang preparat jaringan, secara umum organ usus normal terdiri dari jaringan lamina propia, sub-mukosa dan lamina muskularis (gambar 18). Pada lamina propia dapat ditemukan sel goblet yang berfungsi menghasilkan mukus dan sel kelenjar yang biasa menghasilkan enzim-enzim pada usus. Pada penelitian ini, tidak ditemukan kerusakan/perubahan jaringan pada semua organ usus perlakuan kontrol.

Pada perlakuan PMP dan PMP+ terdapat beberapa perubahan/kerusakan jaringan (*histological alteration*) yang terjadi. Kerusakan jaringan yang terjadi pada organ usus pada penelitian ini di antaranya adalah hemoragi, infiltrasi sel radang, dan nekrosis. Hemoragi diindikasikan dengan keberadaan sel darah merah yang berada di luar pembuluh darah, pada penampang jaringan biasanya ditandai dengan keberadaan sel darah merah diantara ruas jaringan. Kejadian hemoragi tergolong ke dalam pola reaksi *circulatory disturbance*, dan tergolong ke dalam kerusakan jaringan ringan (*important factor 1*).

Infiltrasi sel radang dapat diindikasikan dengan kumpulan sel radang berwarna ungu pada ruas jaringan. Infiltrasi sel radang biasanya menjadi tanda peradangan yang merupakan kerusakan jaringan moderat yang termasuk ke dalam pola reaksi *inflammation*. Nekrosis merupakan kematian dini dari sel pada jaringan. Kerusakan jaringan nekrosis biasanya tidak dapat kembali kepada kondisi semula, sehingga tergolong ke dalam kerusakan jaringan berat (*Impact factors 3*) dan tergolong ke dalam pola reaksi *regressive changes*. Nekrosis dapat ditandai dengan hilangnya inti dan/atau pecahnya sel pada jaringan. Nekrosis yang terjadi di organ usus pada perlakuan PMP dan PMP+ menyebabkan deformasi pada permukaan lamina propia (Gambar 18). Berdasarkan penampang jaringan organ usus pada perlakuan PMP dan PMP+ juga dapat ditemukan penumpukan MP pada lamina propia, terdeposisi di antara sel-sel goblet usus. Gambaran jaringan organ usus dan kerusakannya secara keseluruhan dapat dilihat pada gambar 18.

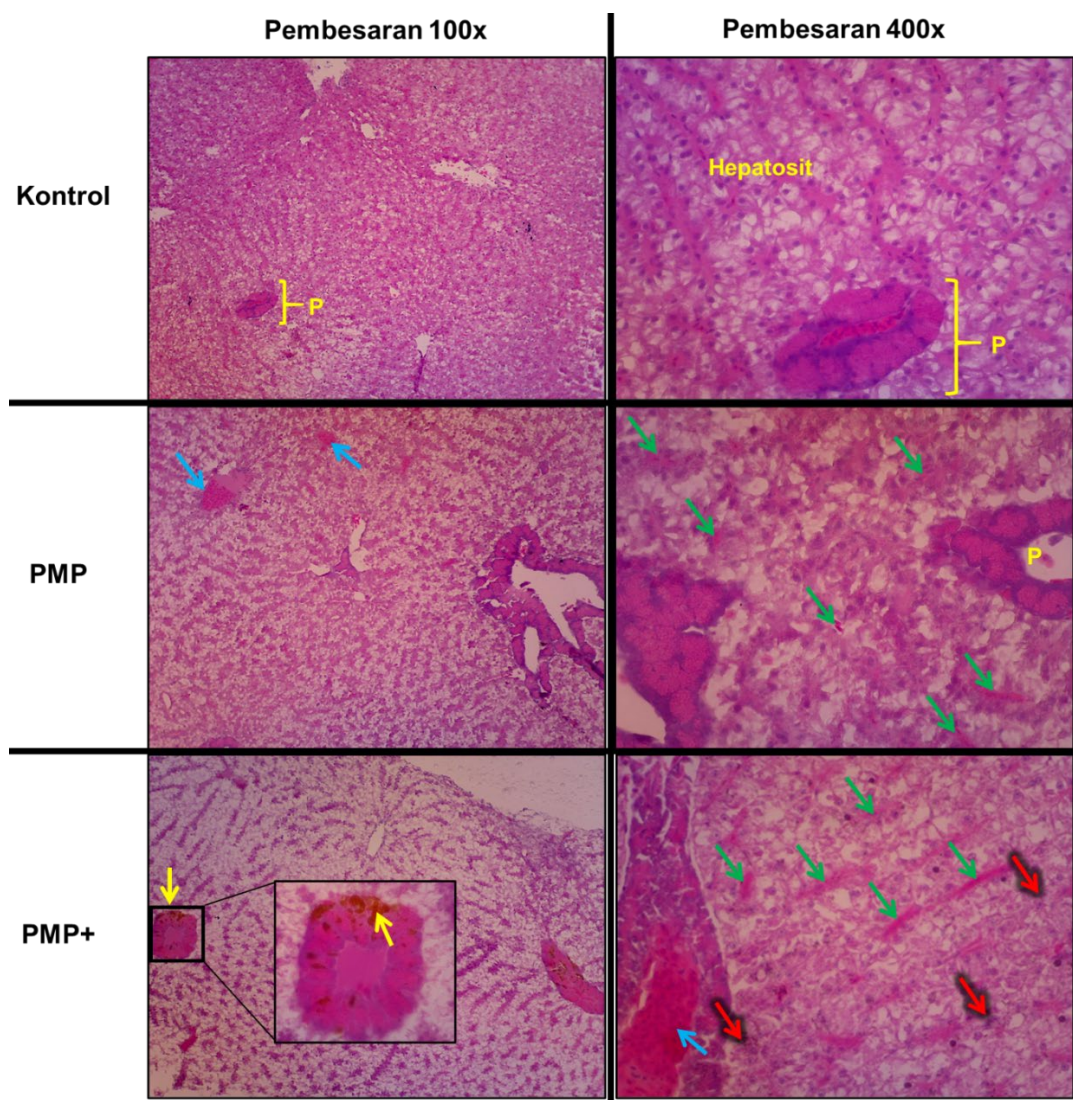


Gambar 18. Gambaran histologi usus ikan nila pada setiap perlakuan, pembesaran 100× dan 400×. Jaringan usus normal terdiri dari lamina propia (LP), submukosa (SM) dan Lamina muskularis (LM). Lamina propia terdiri dari sel goblet (panah hijau) dan kelenjar (panah biru). Perubahan jaringan yang teramati pada sampel: hemoragi (panah merah), nekrosis (panah kuning), infiltrasi sel radang (panah hitam). Terdapat endapan MP pada LP (panah ungu).

Organ hati pada ikan nila tergolong ke dalam hepatopankreas. Organ ini secara umum terdiri dari jaringan hati, yang di dalamnya terdapat hepatosit atau sel hati, dan jaringan pankreas. Sama seperti pada organ usus, perlakuan kontrol tidak menunjukkan adanya kerusakan jaringan di organ hati.

Pada perlakuan PMP dan PMP+, dapat terlihat beberapa kerusakan jaringan yang terjadi pada organ hati. Beberapa kerusakan yang ditemukan pada jaringan di organ hati adalah hemoragi, kongesti, nekrosis dan *melanomacrophage centres* (MMC). Hemoragi dan kongesti merupakan kerusakan jaringan yang tergolong ke dalam pola reaksi *circulatory disturbance*, dengan tingkat kerusakan jaringan tergolong ringan.

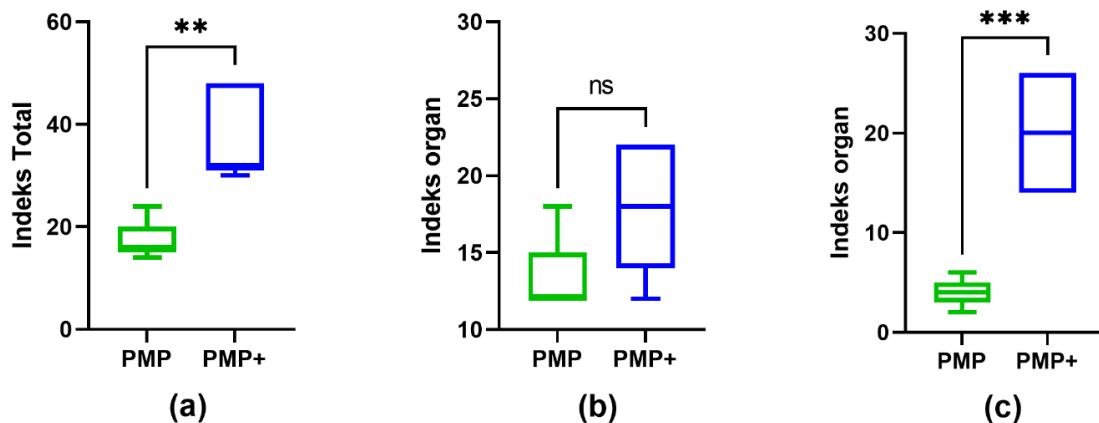
Hemoragi dan kongesti dapat ditemukan baik pada perlakuan PMP maupun pada perlakuan PMP+. Kerusakan jaringan nekrosis dan MMC hanya ditemukan pada perlakuan PMP+. Pada organ hati, nekrosis dapat diindikasikan dengan hilangnya inti sel dari hepatosit, sehingga bentuk dari sel hepatosit ini menjadi samar pada lokasi terjadinya nekrosis. Pada organ hati, kerusakan jaringan nekrosis juga bersifat permanen sehingga tergolong ke dalam kerusakan jaringan berat. Keberadaan MMC pada jaringan diindikasikan dengan keberadaan bercak berwarna coklat atau gelap pada jaringan. Keberadaan MMC pada jaringan tergolong ke dalam pola reaksi *progressive changes* yang tergolong ke dalam kerusakan jaringan moderat, dapat kembali ke kondisi normal jika penyebabnya dihilangkan pada kebanyakan kasus. Kerusakan jaringan pada organ hati dapat dilihat pada gambar 19.



Gambar 19. Gambaran histologi hati ikan nila pada setiap perlakuan, pembesaran 100× dan 400×. Jaringan hati normal terdiri dari hepatosit dan jaringan pankreas (P). Perubahan jaringan yang teramati terdiri dari hemoragi (panah hijau), kongesti (panah biru), nekrosis (panah merah) dan peningkatan melanomakrofag/MMC (panah kuning).

Hasil skor indeks total kerusakan jaringan pada ikan dihitung hanya pada perlakuan PMP dan PMP+, hal ini dikarenakan pada perlakuan kontrol tidak ditemukan kerusakan jaringan pada semua sampel yang diamati (Skor indeks = 0). Rata-rata indeks total kerusakan jaringan pada perlakuan PMP adalah $17,20 \pm 3,90$ ($\bar{x} \pm SD$), lebih rendah secara signifikan dibandingkan perlakuan PMP+ ($38 \pm 9,16$) berdasarkan uji non-parametrik Mann-whitney ($P < 0,05$) (Gambar 20.a).

Berdasarkan rata-rata indeks organ usus, tidak terdapat perbedaan signifikan antara perlakuan PMP ($13,20 \pm 2,68$) dan PMP+ ($18,00 \pm 4,24$) berdasarkan uji Mann-whitney ($P > 0,05$). Sedangkan pada organ hati, terdapat perbedaan signifikan antara rata-rata indeks organ hati pada perlakuan PMP ($4,00 \pm 1,41$) dengan perlakuan PMP+ ($20,00 \pm 6,00$) berdasarkan uji t ($P < 0,05$). Perbandingan indeks organ usus dan hati antar perlakuan dapat dilihat pada gambar 20 b dan c. Nilai *Score value* dan *Important factor* pada organ usus dan hati dapat dilihat pada lampiran 7.



Gambar 20 Boxplot skoring histologi berdasarkan indeks total (a), indeks organ usus (b) dan indeks organ hati (c). ns menunjukkan tidak terdapat perbedaan signifikan antara rata-rata skor berdasarkan uji-t. Tanda bintang ganda (**) menunjukkan perbedaan signifikan antara rata-rata skor berdasarkan uji Mann-whitney ($P < 0,01$). Tanda tiga bintang (***) menunjukkan perbedaan yang lebih signifikan antara rata-rata skor berdasarkan uji Mann-whitney ($P < 0,001$).

D. Pembahasan

Ikan sebagai hewan akuatik sering kali dilaporkan mengingesti MP yang ada di lingkungannya. Keberadaan MP pada dasarnya mengandung zat-zat aditif yang bersifat toksik seperti PBDE dan phthalate yang biasa ditambahkan pada saat plastik diproduksi (Rochman 2015; Andrady 2017). Selain itu, MP sendiri memiliki kemampuan untuk mengadsorpsi zat-zat toksik yang ada di lingkungan perairan seperti POPs, pestisida dan logam (Rochman et al. 2013; Dris et al. 2015; Clark et al. 2016). Keberadaan zat

aditif pada proses produksi dan zat toksik dari lingkungan tersebut kemudian dapat memberikan dampak buruk terhadap organisme akuatik yang terpapar oleh cemaran MP (Rochman et al. 2013, 2014).

Pada penelitian ini, larutan logam timbal digunakan sebagai representatif dari zat toksik yang dapat teradsorpsi dari lingkungan. Logam timbal merupakan salah satu cemaran yang berasal dari kegiatan antropogenik, misalnya saja berasal dari pelapis pipa, penggunaan cat, dan juga dapat berasal dari asap buangan kendaraan bermotor (Darmono 2001). Cemaran logam timbal sudah sering kali dilaporkan terjadi pada lingkungan perairan, mengancam berbagai organisme akuatik mulai dari tingkat trofik rendah hingga tingkat trofik tinggi (Najamuddin et al. 2016; Wicaksono et al. 2016; Werorilangi et al. 2019).

Pada penelitian ini, pakan pada perlakuan kontrol dan PMP+ menunjukkan kandungan logam timbal yang lebih tinggi dibandingkan pakan yang ditambahkan MP tanpa proses perendaman larutan timbal (PMP). Hal ini menunjukkan bahwa pakan komersial yang digunakan dalam perlakuan ini memang sejak awal telah mengandung logam timbal. Keberadaan logam pada pakan ikan memang sudah pernah dilaporkan oleh beberapa penelitian, dengan dugaan sumber logam berasal dari bahan baku pakan (BPWC 2014; Wicaksono et al. 2016; Adamse et al. 2017). Akan tetapi perbedaan konsentrasi logam timbal pada pakan di perlakuan PMP dan PMP+ mengkonfirmasi adanya peningkatan konsentrasi logam timbal pada MP yang telah direndam oleh MP. Kejadian adsorpsi logam timbal oleh MP di alam sudah pernah dilaporkan, misalnya saja di Sungai Musi, Indonesia. Mikroplastik yang diisolasi dari sungai tersebut dapat memiliki kandungan logam timbal mencapai konsentrasi 2,2 mg/kg, dan konsentrasinya sejalan dengan konsentrasi logam timbal yang ada pada air (Purwiyanto et al. 2020). Pada skala laboratorium, proses adsorpsi logam timbal oleh MP dipengaruhi oleh nilai pH dan salinitas air (Ahechti et al. 2020). Kapasitas adsorpsi logam timbal menjadi lebih tinggi jika dilakukan pada pH tinggi (suasana basa) dan salinitas rendah. Pada penelitian ini, proses perendaman dilakukan pada keadaan pH netral dengan salinitas rendah. Hal ini memungkinkan logam timbal cenderung lebih mudah untuk teradsorpsi pada MP. Selain itu, proses adsorpsi logam timbal pada MP juga terjadi secara cepat pada 48 jam pertama (Ahechti et al. 2020), sehingga pada hari ketiga perendaman (saat perendaman MP selesai dilakukan), logam timbal yang teradsorpsi pada MP mungkin sudah mencapai fase jenuh. Kejadian adsorpsi logam timbal pada MP yang kemudian ditambahkan pada pakan, memiliki peluang untuk memberikan efek buruk lebih besar terhadap hewan uji pada perlakuan PMP+.

Jika ditinjau dari profil sel darah putih ikan, dapat diketahui bahwa terjadi peningkatan jumlah sel darah putih ikan pada perlakuan PMP dan PMP+ jika

dibandingkan dengan perlakuan kontrol. Peningkatan jumlah sel darah putih ini diiringi dengan penurunan proporsi sel limfosit dan peningkatan proporsi sel monosit pada sel darah putih. Peningkatan atau penurunan jumlah dan komposisi sel darah putih dapat menjadi indikator dari perubahan keadaan imun pada tubuh ikan (Seibel et al. 2021). Sel monosit merupakan salah satu jenis sel darah putih yang berperan dalam sistem imun non-spesifik. Sel monosit dapat terdiferensiasi menjadi bentuk makrofag pada jaringan yang terinfeksi patogen/*non-self material* dan berperan dalam proses fagositosis (Firdaus-Nawi & Zamri-Saad 2016).

Keberadaan fisik MP pada pakan dapat merusak dinding organ pencernaan. Dinding usus pada dasarnya merupakan *physical barriers*, bentuk pertahanan pertama ikan terhadap kehadiran patogen/*non-self material* (Lieschke & Trede 1993; Smith et al. 2019). Dengan rusaknya dinding usus, maka respons pertahanan non-spesifik akan mulai bekerja. Respons imun non spesifik yang pertama bekerja setelah adanya infeksi patogen adalah mekanisme fagositosis, yang dilakukan oleh sel neutrofil dan monosit (Lieschke & Trede 1993; Firdaus-Nawi & Zamri-Saad 2016). Adanya respon imun non-spesifik inilah yang mungkin menyebabkan peningkatan sel monosit yang ada pada darah ikan di perlakuan PMP dan PMP+.

Pada keberadaan partikel asing, biasanya akan memicu terjadinya *danger-associated molecular pattern* (DAMP), berupa protein yang dikeluarkan oleh sel-sel tubuh yang stres dan rusak untuk menginformasikan kepada sel imun non spesifik bahwa terjadi kerusakan pada tubuh (Heil & Land 2014). Keberadaan protein ini kemudian direspons dengan aktivitas peradangan dan stres pada ikan. Saat ikan mengalami stres, hormon kortisol juga akan disekresikan. Pelepasan hormon kortisol dapat meningkatkan jumlah sel darah putih, akan tetapi menurunkan jumlah sel limfosit dan meningkatkan jumlah sel monosit dan netrofil (Seibel et al. 2021). Hal ini menyebabkan ikan mengalami penurunan kekuatan sistem imun adaptif dan merangsang terjadinya peradangan. Pola ini pernah dilaporkan misalnya saja pada efek pencemaran minyak mentah, yang mana ikan *Fundulus grandis* dan *Salmo trutta* dari lokasi kejadian kebocoran minyak di Teluk Meksiko menunjukkan penurunan signifikan jumlah limfosit dan peningkatan jumlah monosit (Ali et al. 2014). Keadaan stres ini juga akan membuat konsumsi energi secara berlebih pada ikan, yang mungkin dapat berujung pada kelelahan, perlambatan pertumbuhan bahkan kematian yang pada akhirnya juga menurunkan nilai laju pertumbuhan spesifik dan sintasan ikan (Fujaya 2004).

Keberadaan MP dapat merusak jaringan pada berbagai macam organ. Kerusakan jaringan pada organ ikan sangat tergantung kepada konsentrasi, ukuran dan bentuk dari MP yang dipaparkan pada ikan (Jabeen et al. 2018). Pada penelitian ini,

kerusakan jaringan pada organ usus dan hati dapat terjadi akibat pemaparan pakan mengandung MP. Kerusakan yang terjadi di usus menunjukkan adanya kematian sel (nekrosis) pada usus ikan yang mengonsumsi pakan mengandung MP (Perlakuan PMP dan PMP+), kerusakan ini juga menyebabkan deformasi pada struktur jaringan lamina propria usus. Hal ini mungkin disebabkan dari keberadaan fisik dari MP pada organ usus, yang mana pada penelitian ini jenis MP yang digunakan adalah dalam bentuk *fragment*. Mikroplastik dalam bentuk *fragment* diketahui memiliki sudut-sudut meruncing yang dapat memberikan dampak lebih besar pada ikan jika dibandingkan bentuk MP yang lebih membulat (*pellet*) (Choi et al. 2018). Nekrosis dan deformasi pada dinding usus ini juga pada akhirnya dapat berujung pada pendarahan (hemoragi) dan peradangan akibat dari rusaknya pembuluh darah dan aktivitas sistem imun non spesifik pada jaringan yang rusak.

Berdasarkan perhitungan organ indeks, tidak terdapat perbedaan signifikan tingkat kerusakan pada jaringan usus antara perlakuan PMP dan PMP+. Hal ini menjadi indikasi bahwa keberadaan konsentrasi logam timbal yang lebih tinggi tidak memberikan dampak signifikan pada kerusakan jaringan yang ada di usus. Dengan kata lain, keberadaan fisik MP memberikan efek lebih besar pada kerusakan jaringan di usus ikan.

Hal yang berbeda terjadi pada organ hati. Organ indeks hati pada perlakuan PMP+ lebih tinggi jika dibandingkan dengan perlakuan PMP. Hal ini mengindikasikan adanya kerusakan jaringan yang lebih parah pada organ hati akibat keberadaan konsentrasi logam timbal yang lebih tinggi. Pada perlakuan PMP+ ditemukan kerusakan jaringan nekrosis dan MMC, yang mana kerusakan tersebut tidak ditemukan pada perlakuan PMP. *Melanomacrophage centres*/MMC sendiri merupakan penumpukan dari agregat makrofag dan juga pewarna melanin serta sisa bahan xenobiotik pada jaringan (Koppang et al. 2007; Ali et al. 2014). keberadaan MMC sudah sejak lama dijadikan suatu indikasi dari keberadaan pencemaran dan penurunan kesehatan ikan (Ali et al. 2014; Morrison et al. 2014).

Ikan nila yang dipaparkan oleh larutan timbal berkonsentrasi 2,5 ppm dapat menyebabkan dilatasi pembuluh darah dan pembentukan MMC, sedangkan jika konsentrasinya ditingkatkan menjadi 5 ppm akan menimbulkan nekrosis pada sel hati (Khidr et al. 2012). proses dilatasi pembuluh darah ini pada akhirnya akan menimbulkan pola reaksi *circulatory disturbance* berupa kongesti dan hemoragi. Beberapa penelitian juga menunjukkan adanya pengaruh dari konsumsi MP pada kondisi jaringan organ hati. Ikan yang ditangkap pada lokasi dekat pabrik plastik (dengan konsentrasi MP pada air dan sedimen yang tinggi) memiliki nilai indeks organ hati yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan ikan kontrol (Li et al. 2020). Hal ini menunjukkan adanya dampak dari ingesti MP terhadap kerusakan jaringan pada organ hati. Pada penelitian ini, indeks

organ hati pada perlakuan PMP+ menunjukkan organ indeks yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan PMP, menunjukkan adanya peranan dari keberadaan logam timbal pada MP terhadap semakin parahny kerusakan jaringan pada organ hati.

Penelitian ini memberikan perspektif lebih terhadap dampak MP pada ikan nila sebagai komoditas ikan yang umum dimanfaatkan langsung dari alam maupun melalui proses budidaya. Dampak MP pada hewan akuatik tentu saja memiliki dimensi yang sangat luas terkait konsentrasi, bentuk, jenis polimer dan keberadaan aditif pada MP. Sehingga penelitian lanjutan mengenai dampak cemaran MP terhadap ikan perlu dilakukan, terutama yang berfokus pada penentuan konsentrasi efektif MP. Keberadaan dampak buruk MP pada ikan juga menunjukkan pentingnya pengelolaan sampah/limbah padat untuk mencegah kenaikan kelimpahan MP di lingkungan perairan.

E. Kesimpulan dan Saran/Rekomendasi

Penelitian ini menunjukkan adanya pengaruh buruk keberadaan MP pada pakan terhadap kesehatan ikan nila. Pengaruh buruk keberadaan MP dapat teramati melalui parameter sederhana seperti profil sel darah putih dan gambaran histopatologi. Keberadaan MP pada diet dapat meningkatkan respons imun non-spesifik pada ikan nila berupa peningkatan jumlah sel darah putih dan peningkatan proporsi sel monosit. Keberadaan fisik MP dapat memberikan dampak berupa peradangan dan kematian sel pada jaringan usus. Selain itu, keberadaan logam timbal pada MP yang dikonsumsi juga dapat memberikan efek yang lebih buruk pada organ hati, berupa adanya kejadian MMC dan nekrosis. Dengan adanya dampak buruk MP pada ikan, maka upaya pengelolaan sampah padat untuk mengurangi MP di lingkungan perairan penting untuk dilakukan.

V. Pembahasan Umum

Penelitian mengenai pencemaran mikroplastik (MP) di Indonesia saat ini sudah mulai berkembang (Purba et al. 2019; Alam & Rachmawati 2020). Akan tetapi, penelitian yang dilakukan saat ini masih banyak berfokus ke lingkungan laut. Sementara itu, penelitian mengenai MP di lingkungan sungai, sebagai ekosistem yang menghantarkan cemaran MP dari daratan ke lingkungan laut, masih mendapatkan sedikit atensi dan butuh pengembangan lebih lanjut (Lebreton et al. 2017; Vriend et al. 2021). Kota Makassar, dengan penduduk 1,5 juta jiwa, pada tahun 2019 menghasilkan hingga hampir 232 ton timbulan sampah plastik per hari (KLHK 2019; BPS Kota Makassar 2020). Keadaan ini menjadikan Kota Makassar sebagai salah satu lokasi yang berpotensi memberikan masukan cemaran sampah plastik ke lingkungan perairan, termasuk lingkungan sungai.

Lingkungan sungai di Kota Makassar saat ini masih digunakan sebagai lokasi kegiatan perikanan baik pada perikanan tangkap maupun budidaya. Dengan keberadaan cemaran MP pada lokasi sungai maka diduga akan memberikan dampak buruk terhadap aktivitas perikanan yang dilakukan di Sungai-sungai yang ada di Kota Makassar, hal ini terutama terkait dengan keamanan pangan dan Kesehatan ikan yang dimanfaatkan dari lokasi tersebut (Rochman et al. 2013; Galloway 2015). Dengan sedikitnya data terkait cemaran MP, maka penelitian terkait profil pencemaran MP di Sungai-sungai Kota Makassar penting untuk dilakukan.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kondisi dan profil pencemaran MP yang ada di Sungai-sungai di Kota Makassar. Sungai Tallo dan Jeneberang, sebagai sungai utama di Kota Makassar, dipilih sebagai lokasi kajian pada penelitian ini. Tahap pertama evaluasi profil pencemaran MP di lingkungan sungai dimulai dengan identifikasi kelimpahan dan karakteristik MP pada air dan sedimen sungai. Hal ini terkait dengan air dan sedimen sebagai kompartemen pertama di lingkungan akuatik yang mendapatkan masukan MP (Wright et al. 2013). Temuan pada tahap pertama penelitian ini menunjukkan adanya variasi kelimpahan MP secara spasial antara Sungai Tallo dan Jeneberang. Kelimpahan MP di Sungai Tallo cenderung lebih tinggi di lokasi muara sungai dan rendah di bagian hulu, berbanding terbalik dengan tren MP di Sungai Jeneberang yang cenderung tinggi di lokasi hulu sungai dan rendah di muara.

Perbedaan tren spasial cemaran MP di Sungai Tallo dan Jeneberang menunjukkan perbedaan karakteristik aliran dari kedua sungai. Berdasarkan penggunaan lahan di sekitar sungai, dapat dilihat tren ini juga bersesuaian dengan

tingkat kepadatan daerah berpenduduk di kedua lokasi sungai. Lokasi yang bersebelahan dengan lingkungan padat penduduk (*upstream* Sungai Jeneberang dan muara Sungai Tallo) cenderung memiliki kelimpahan MP yang lebih tinggi dibandingkan dengan lokasi yang tidak bersebelahan secara langsung dengan lingkungan berpenduduk (muara Sungai Jeneberang dan hulu Sungai Tallo). Hal ini mengindikasikan bahwa keberadaan lokasi berpenduduk masih menjadi sumber utama dari cemaran MP di lingkungan sungai (Alam et al. 2019).

Selain keberadaan lokasi penduduk, perbedaan karakteristik aliran sungai diduga juga berpengaruh pada distribusi spasial kelimpahan MP di kedua sungai. Sungai Tallo yang cenderung dikelilingi oleh ekosistem bakau dapat mencegah masukan MP dari mekanisme air limpasan dari lingkungan kota (Govender et al. 2020). Kemudian aliran Sungai Tallo yang tidak terdapat *obstacle* apa pun juga menjadikan keberadaan partikel MP dapat langsung berpindah menuju muara. Hal yang berbeda terjadi di Sungai Jeneberang, pada lokasi ini terdapat beberapa bendungan yang dapat menyebabkan retensi pada MP sehingga tidak langsung mengalir menuju ke lokasi muara sungai (Watkins et al. 2019; Wang et al. 2020).

Penelitian tahap pertama sudah membuktikan keberadaan polutan MP di Sungai Tallo dan Jeneberang. Penelitian tahap kedua lebih difokuskan pada identifikasi MP yang ada pada biota perairan di kedua sungai. Hal ini terutama pada organisme yang dimanfaatkan sebagai bahan pangan oleh masyarakat sekitar. Keberadaan MP pada lingkungan sungai (air dan sedimen) dilaporkan pada beberapa lokasi memiliki peluang untuk dapat teringesti pada organisme akuatik (McNeish et al. 2018; Garcia et al. 2020; Wang, et al. 2020). Sehingga informasi mengenai keberadaan MP pada biota akuatik juga menjadi penting untuk diketahui. Pada penelitian ini, biota kerang dan ikan dipilih sebagai representatif karena keduanya merupakan komoditas perikanan konsumsi yang sering dimanfaatkan masyarakat pada kedua sungai.

Hasil penelitian tahap dua membuktikan bahwa MP yang ada pada kompartemen lingkungan sudah dapat berpindah ke kompartemen biota. Hal ini ditunjukkan dengan keberadaan MP pada sembilan spesies biota yang diamati pada lingkungan sungai di Kota Makassar dengan kisaran level kontaminasi berkisar antara 32 - 80%. Berdasarkan kebiasaan makan, organisme dengan kebiasaan makan herbivor cenderung memiliki kelimpahan MP lebih besar dibandingkan dengan kebiasaan makan karnivor. Hal ini menunjukkan peluang keterlibatan tanaman akuatik sebagai salah satu perantara perpindahan MP dari lingkungan ke organisme akuatik (Kalčíková 2020).

Secara umum, profil MP yang ada pada air, sedimen dan ikan memiliki kesamaan, terutama dari segi ukuran, bentuk dan jenis polimernya. Hal ini menunjukkan adanya indikasi keterkaitan antara MP yang ditemukan pada lingkungan sungai dengan

yang ditemukan pada organisme sungai. Pada penelitian ini, polimer MP yang ditemukan pada organisme perairan keseluruhannya dapat ditemukan juga pada kompartemen lingkungannya (air dan sedimen). Polimer-polimer tersebut di antaranya adalah polietilena, polipropilena, rayon dan poliester (Lampiran 8). Polietilena dan polipropilena dalam bentuk *fragment* biasanya berasal dari hasil fragmentasi plastik dengan ukuran plastik lebih besar. Hal ini juga terkait dengan kedua polimer tersebut merupakan polimer paling banyak diproduksi dan penggunaannya paling luas dibandingkan dengan jenis polimer lain (Geyer et al. 2017). Polimer dari jenis rayon dan poliester biasanya berasal dari tekstil. Dalam sekali proses pencucian pakaian berbahan poliester dengan menggunakan mesin cuci dapat mengeluarkan lebih dari 500.000 potongan *line* MP pada air hasil cucuannya (Napper & Thompson 2016). Hal ini menjadikan kegiatan *laundry* sebagai sumber polutan MP yang sangat besar pada area domestik, tidak terkecuali di Kota Makassar.

Setelah penelitian tahap pertama dan kedua mengkonfirmasi keterkaitan ingesti MP pada ikan dari lingkungannya, maka penelitian tahap terakhir dilakukan untuk memprakirakan dampak dari ingesti MP ini pada organisme akuatik. Dalam penelitian ini, ikan nila sebagai jenis ikan yang paling sering dimanfaatkan dari Sungai Tallo dan Jeneberang dipilih sebagai model organisme representatif dari lokasi studi. Penelitian yang dilakukan secara eksperimental dengan pemaparan MP melalui dietary exposure, menunjukkan adanya dampak berupa penurunan sintasan dan kerusakan jaringan pada hati dan usus ikan nila. Kerusakan jaringan pada organ pada akhirnya akan memicu stres pada ikan dan berpotensi untuk mengurangi laju pertumbuhannya. Penurunan nilai sintasan dan pengurangan laju pertumbuhan pada akhirnya dapat memberikan dampak negatif secara ekonomi pada pemanfaatan organisme akuatik yang ada di Sungai Tallo dan Jeneberang.

Dampak tersebut ditambah dengan MP yang dapat berfungsi sebagai vektor patogen dan polutan lain dari lingkungan kepada organisme akuatik (Rochman 2015; Bowley et al. 2021). Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa MP dapat menjadi media penempelan pada bakteri patogen seperti *Vibrio* dan *Aeromonas*, yang dapat menyebabkan penyebaran penyakit (De Tender et al. 2015; Kirstein et al. 2016; Viršek et al. 2017). Kemudian keberadaan MP juga dapat mengadsorpsi berbagai polutan yang ada di lingkungan akuatik seperti logam dan POPs (Rochman 2015). menjadikannya lebih bersifat tersedia secara biologis pada organisme akuatik.

Berdasarkan temuan-temuan di atas, saat ini Sungai Tallo dan Jeneberang sudah terkontaminasi oleh MP. Akan tetapi jika ditinjau dari besarnya kelimpahan MP, tingkat pencemarannya masih jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan beberapa sungai-sungai lain yang ada di Pulau Jawa, sebagai pulau dengan penduduk terpadat di

Indonesia. Hal ini harus menjadi salah satu pendorong bagi pemerintah dan pihak-pihak yang terkait dalam pengelolaan sampah serta pihak yang memanfaatkan sumber daya alam dari Sungai-sungai di Kota Makassar untuk menjaga lingkungan sungai tersebut agar tidak tercemar lebih jauh oleh MP.

Berdasarkan temuan pada penelitian ini, maka dapat dirumuskan beberapa rekomendasi sebagai berikut:

1. Melakukan *improvement* dalam pelaksanaan *reduce*, *reuse* dan *recycle* dalam pengelolaan plastik di masyarakat. Keberadaan *fragment* MP dengan jenis polietilena masih banyak ditemukan di lingkungan Sungai-sungai kota Makassar. Keberadaan MP dengan jenis tersebut merupakan salah satu indikasi dari fragmentasi MP dari plastik dengan ukuran lebih besar. Sehingga proses pengurangan (*reduce*), penggunaan kembali (*reuse*) dan daur ulang (*recycle*) plastik yang diiringi dengan usaha lebih dalam pengoleksian kembali sampah plastik perlu untuk dilakukan.
2. Melakukan upaya pengolahan pada limbah *laundry*. Jenis MP yang paling banyak ditemukan di lokasi Sungai-sungai Kota Makassar juga terdiri dari *line* MP dengan polimer poliester dan rayon, yang diduga kuat berasal dari bahan tekstil. Kota Makassar yang dalam hal ini tidak memiliki fasilitas pengolahan air limbah kota menjadi sangat berpeluang untuk memberikan masukan *line* MP ke lingkungan sungai. Beberapa upaya yang mampu diterapkan misalnya adalah peraturan pemasangan filter (misalnya filter Lint LUV-R) pada mesin cuci. Berdasarkan penelitian, filter lint LUV-R mampu mengurangi jumlah emisi line MP hingga 87% pada limbah hasil cucian (McIlwraith et al. 2019).
3. Memberikan sosialisasi kepada masyarakat terkait dengan keberadaan MP pada lingkungan perairan dan komoditas ikan hasil tangkapan. Sehingga masyarakat dapat menerapkan beberapa panduan praktis seperti tidak mengonsumsi isi perut ikan, melakukan proses depurasi pada komoditas ikan budidaya, dan juga menempatkan filter pada pintu-pintu tambak sebagai usaha awal pencegahan MP masuk ke lokasi budidaya.

Terkait dengan teknis pelaksanaan penelitian, masih terdapat beberapa limitasi penelitian yang bisa dijadikan pertimbangan bagi penelitian lanjutan terkait dengan studi pencemaran MP di lingkungan perairan, dan khususnya pada ekosistem sungai. Beberapa limitasi penelitian yang dimaksud dan saran penulis dituliskan pada beberapa poin berikut :

1. Terkait dengan waktu pengambilan sampel, pada penelitian ini hanya dilakukan pada musim hujan dan kemarau. Penelitian lanjutan untuk mengevaluasi profil pencemaran MP pada musim peralihan juga penting dilakukan di lokasi studi.

Mengingat musim peralihan diduga juga dapat memberikan signifikansi pada kondisi pencemaran plastik di lingkungan sungai.

2. Pengambilan sampel air pada penelitian ini menggunakan metode *volume-reduce*, dengan alat jaring *neuston* dengan ukuran mata jaring 330 μm . Hal ini akan membuat MP dengan ukuran $<330 \mu\text{m}$ akan berada pada kondisi "*undersampled*". Kemudian pada lokasi sungai dengan lebar sungai yang tidak terlalu lebar, penggunaan perahu akan sulit dilakukan. Pada kondisi tersebut penggunaan metode *volume-reduce* dengan plankton net dan *bulk* sampling akan menjadi alternatif yang lebih baik.
3. Dalam proses ekstraksi MP dari sampel sedimen, larutan yang digunakan pada penelitian ini adalah NaCl 30% dengan densitas $1,2 \text{ g/cm}^3$. Beberapa jenis larutan garam lain dapat digunakan untuk mencapai nilai densitas yang lebih tinggi seperti NaI dan ZnCl_2 . Hal ini akan memungkinkan polimer dengan densitas lebih tinggi ($>1,2 \text{ g/cm}^3$) lebih mudah didapatkan dari sampel sedimen.
4. Dalam deteksi polimer, penggunaan spektrofotometer inframerah menggunakan metode KBr dan ATR masih memiliki beberapa limitasi terkait dengan jumlah dan ukuran MP yang dapat dideteksi jenis polimernya. Penggunaan metode lain seperti spektrofotometer inframerah dengan aksesoris μATR atau FPA (*focal plane array*) memungkinkan untuk mendapatkan hasil pembacaan polimer MP lebih baik secara kuantitas dan kualitas.
5. Pada uji toksisitas MP pada ikan, penelitian ini masih menggunakan 1 variasi dosis MP. Pada penelitian lanjutan, dapat dilakukan dengan variasi dosis/konsentrasi MP yang berbeda, selain itu pendekatan molekuler pada ekspresi gen penanda imun dan tingkat stres pada ikan juga bisa dilakukan.
6. Untuk memastikan adanya adsorpsi logam timbal pada proses perendaman MP, dapat dilakukan juga pengukuran konsentrasi timbal pada larutan hasil perendaman untuk memastikan adanya pengurangan konsentrasi logam pada media perendaman. Hal ini bisa menjadi indikator tambahan untuk melihat adanya proses adsorpsi logam oleh MP.

VI. Kesimpulan Umum dan Rekomendasi

A. Kesimpulan umum

Sungai-sungai di Kota Makassar sudah tercemar oleh MP. Kelimpahan MP pada lingkungan sungai di Kota Makassar secara umum lebih tinggi di musim kemarau. Tren spasial kelimpahan MP pada sungai juga dipengaruhi oleh karakteristik sungai dan keberadaan sumber polutan MP. Mikroplastik yang ada pada lingkungan sungai juga sudah mengontaminasi semua sampel spesies biota perairan pada penelitian ini. Ikan dengan kebiasaan makan herbivor secara umum memiliki nilai kelimpahan MP lebih tinggi dibandingkan ikan karnivor. Jenis polimer yang ditemukan di Sungai-sungai Kota Makassar adalah polietilena, polipropilena, rayon dan poliester. Sumber pencemaran MP pada Sungai di Kota Makassar diduga berasal dari fragmentasi sampah plastik dan limbah hasil *laundry*. Berdasarkan penelitian eksperimen, keberadaan MP dapat menyebabkan peningkatan respons imun non-spesifik dan kerusakan pada jaringan organ usus dan hati, yang dapat berakibat pada penurunan sintasan dan perlambatan pertumbuhan ikan.

B. Rekomendasi

Penelitian ini memberikan gambaran umum mengenai status cemaran MP di lingkungan Sungai yang ada di Kota Makassar, salah satu kota terbesar di Indonesia Timur. Keberadaan cemaran MP di Sungai-sungai Kota Makassar sebaiknya mendapatkan perhatian serius dari pihak-pihak terkait, mengingat dampak yang mungkin dihasilkan terhadap ekosistem. Sehingga beberapa saran dan rekomendasi yang diajukan berdasarkan temuan pada penelitian ini meliputi:

1. Melakukan sosialisasi kepada masyarakat terkait 3R (reduce, reuse dan recycle) yang baik dalam pengelolaan sampah plastik. Diiringi dengan aturan pelarangan pembuangan sampah ke sungai dan peningkatan infrastruktur untuk usaha koleksi ulang sampah plastik.
2. Melakukan upaya pengolahan limbah hasil *laundry*.
3. Melakukan sosialisasi kepada masyarakat terkait panduan praktis dalam penghindaran dari dampak MP pada bahan pangan. Seperti penghindaran konsumsi saluran cerna ikan, praktik usaha depurasi pada perikanan budidaya dan upaya pemasangan filter pada pintu air tambak budidaya.

Daftar Pustaka

- Adamse, H.J.P., Fels-Klerx, V. D., Jong, J. D., 2017. Cadmium, lead, mercury and arsenic in animal feed and feed materials – trend analysis of monitoring results. *Food Additives & contaminants: Part A*. 34(8): 1298-1311. DOI: 10.1080/19440049.2017.1300686.
- Afdal, M., Werorilangi, S., Faizal, A., Tahir, A., 2019. Studies on Microplastics Morphology Characteristics in the Coastal Water of Makassar City, South Sulawesi, Indonesia. *Int. J. Environ. Agric. Biotechnol.* 4, 1028–1033. <https://doi.org/10.22161/ijeab.4421>
- Ahechti, M., Benomar, M., El Alami, M., Mendiguchía, C., 2020. Metal adsorption by microplastics in aquatic environments under controlled conditions: exposure time, pH and salinity. *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 1–8. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1733546>
- Aida, S.N., 2015. Laju dan pola pertumbuhan, serta kebiasaan makan ikan tawes, *Barbonymus gonionotus* di Waduk Gajah Mungkur, Jawa Tengah. *Prosiding Seminar Nasional Ikan Ke-8. Masyarakat Iktiologi Indonesia*, pp. 251–258.
- Alam, F.C., Sembiring, E., Muntalif, B.S., Suendo, V., 2019. Microplastic distribution in surface water and sediment river around slum and industrial area (case study: Ciwalengke River, Majalaya district, Indonesia). *Chemosphere* 224, 637–645. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.188>
- Alam, F.C., Rachmawati, M., 2020. Perkembangan Penelitian Mikroplastik di Indonesia. *J. Presipitasi* 17, 344–352.
- Ali, A.O., Hohn, C., Allen, P.J., Ford, L., Dail, M.B., Pruett, S., Petrie-Hanson, L., 2014. The effects of oil exposure on peripheral blood leukocytes and splenic melanomacrophage centers of Gulf of Mexico fishes. *Mar. Pollut. Bull.* 79, 87–93. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.12.036>
- Andrady, A.L., 2017. The plastic in microplastics: A review. *Mar. Pollut. Bull.* 119, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.082>
- Arafat, Y., Saleh Pallu, M., Maricar, F., Lopa, R.T., 2015. Morphology evolution of lower Jeneberang River, Indonesia. *Int. J. Earth Sci. Eng.* 8, 2011–2016.
- Bahri, A.R.S., Ikhtiar, M., Baharuddin, A., Abbas, H.H., 2020. Identification of Microplastic in Tilapia Fish (*Oreochromis mossambicus*) at Tallo River in Macassar. *Int. J. Sci. Healthc. Res.* 5, 406–411.
- Barboza, L.G.A., Dick Vethaak, A., Lavorante, B.R.B.O., Lundebye, A., Guilhermino, L., 2018. Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health. *Mar. Pollut. Bull.* 133, 336–348. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.05.047>
- Barnes, D.K.A., Galgani, F., Thompson, R.C., Barlaz, M., 2009. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 364, 1985–1998. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
- Bernet, D., Schmidt, H., Meier, W., Wahli, T., 1999. Histopathology in fish: Proposal for a protocol to assess aquatic pollution. *J. Fish Dis.* 22, 25–34.
- Bessa et al., 2019. Harmonized protocol for monitoring microplastics in biota. JPI-Oceans BASEMAN project.
- BIG (Geospatial Information Agency of the Republic of Indonesia), 2019. Digital Topographic Map of Indonesia. Bogor, West Java.
- Blaxhall, P.C., Daisley, K.W., 1973. Routine haematological methods for use with fish blood. *J. Fish Biol.* 5, 771–781. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1973.tb04510.x>

- Boucher, J., Friot, D., 2017. Primary microplastics in the oceans: A global evaluation of sources, Primary microplastics in the oceans: A global evaluation of sources. Gland, Switzerland. <https://doi.org/10.2305/iucn.ch.2017.01.en>
- Bowley, J., Baker-Austin, C., Porter, A., Hartnell, R., Lewis, C., 2021. Oceanic Hitchhikers – Assessing Pathogen Risks from Marine Microplastic. Trends Microbiol. 29, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2020.06.011>
- BPS Indonesia, 2019. Indonesia Dalam Angka 2019. Jakarta.
- BPS Kota Makassar, 2020. Kota Makassar Dalam Angka 2020. Makassar.
- BPWC., 2016. Laporan pemeriksaan kadar logam berat pada ikan, pakan ikan dan sedimen di Waduk Cirata. Bandung Barat. 36 hal.
- Browne, M.A., Galloway, T., Thompson, R., 2007. Microplastic--an emerging contaminant of potential concern? Integr. Environ. Assess. Manag. 3, 559–561. <https://doi.org/10.1897/1551-3793>
- Carpenter, E.J., Smith, K.L., 1972. Plastics on the Sargasso Sea Surface. Science (80-.). 175, 1240–1241. <https://doi.org/10.1126/science.175.4027.1240>
- Carpenter, K.E., Niem, V.H., 1998. FAO species identification guide for fisheries purposes. The Living Marine Resources of the Western Central Pacific. Volume 1. Seaweeds, corals, bivalves and gastropods. FAO. Rome : 686 hal
- Carpenter, K.E., Niem, V.H., 1999. FAO species identification guide for fisheries purposes. The Living Marine Resources of the Western Central Pacific. Volume 4. Bony fishes part 2 (*mugilidae* to *carangidae*). FAO. Rome : 686 hal
- Choi, jin soo, Jung, Y., Hong, N., Hee, S., Park, J., 2018. Toxicological effects of irregularly shaped and spherical microplastics in a marine teleost , the sheepshead minnow (*Cyprinodon variegatus*). Mar. Pollut. Bull. 129, 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.02.039>
- Clark, J.R., Cole, M., Lindeque, P.K., Fileman, E., Blackford, J., Lewis, C., Lenton, T.M., Galloway, T.S., 2016. Marine microplastic debris: a targeted plan for understanding and quantifying interactions with marine life. <https://doi.org/10.1002/fee.1297>
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., Galloway, T.S., 2011. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. Mar. Pollut. Bull. 62, 2588–2597. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>
- Cole, M., Lindeque, P., Fileman, E., Halsband, C., Goodhead, R., Moger, J., Galloway, T.S., 2013. Microplastic Ingestion by Zooplankton. Environ. Sci. Technol. 47, 6646–6655. <https://doi.org/10.1021/es400663f>
- Coppock, R.L., Cole, M., Lindeque, P.K., Queirós, A.M., Galloway, T.S., 2017. A small-scale, portable method for extracting microplastics from marine sediments. Environ. Pollut. 230, 829–837. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.017>
- Corcoran, P.L., Biesinger, M.C., Grifi, M., 2009. Plastics and beaches: A degrading relationship. Mar. Pollut. Bull. 58, 80–84. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.08.022>
- Cordova, M.R., Purwiyanto, A.I.S., Suteja, Y., 2019. Abundance and characteristics of microplastics in the northern coastal waters of Surabaya, Indonesia. Mar. Pollut. Bull. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.040>
- Cowger, W., Steinmetz, Z., Gray, A., Munno, K., Lynch, J., Hapitch, H., Primpke, S., Frond, H. D., Rochman, C., Herodotou, O., 2021. Microplastic spectral classification needs an open source community: open specy to the rescue!. Anal. Chem. 93, 7543-7548. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.1c00123>
- Crawford, C.B., Quinn, B., 2017. Microplastic Pollutants, Microplastic Pollutants. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04315-5>

- da Costa, J.P., Duarte, A.C., Rocha-Santos, T.A.P., 2017. Microplastics – Occurrence, Fate and Behaviour in the Environment, in: Rocha-Santos, T.A.P., Duarte, A.C. (Eds.), *Characterization and Analysis of Microplastics*. Elsevier, Amsterdam, pp. 1–24. <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2016.10.004>
- Dantas, N.C.F.M., Duarte, O.S., Ferreira, W.C., Ayala, A.P., Rezende, C.F., Feitosa, C. V., 2020. Plastic intake does not depend on fish eating habits: Identification of microplastics in the stomach contents of fish on an urban beach in Brazil. *Mar. Pollut. Bull.* 153, 110959. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110959>
- Darmono, 2001. *Lingkungan hidup dan pencemaran : hubungannya dengan toksikologi senyawa logam*. UI-Press, Jakarta.
- Datu, S.S., Supriadi, S., Tahir, A., 2019. Microplastic in *Cymodocea rotundata* Seagrass Blades. *Int. J. Environ. Agric. Biotechnol.* 4, 1758–1761. <https://doi.org/10.22161/ijeab.46.21>
- de Sá, L.C., Luís, L.G., Guilhermino, L., 2015. Effects of microplastics on juveniles of the common goby (*Pomatoschistus microps*): Confusion with prey, reduction of the predatory performance and efficiency, and possible influence of developmental conditions. *Environ. Pollut.* 196, 359–362. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.10.026>
- De Tender, C.A., Devriese, L.I., Haegeman, A., Maes, S., Ruttink, T., Dawyndt, P., 2015. Bacterial community profiling of plastic litter in the Belgian part of the North Author names and affiliations 4. *Environmental Sci. Technol.* 49, 9629–9638.
- Ding, J., Zhang, S., Razanajatovo, R.M., Zou, H., Zhu, W., 2018. Accumulation, tissue distribution, and biochemical effects of polystyrene microplastics in the freshwater fish red tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Environ. Pollut.* 238, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.03.001>
- Ding, L., Mao, R. fan, Guo, X., Yang, X., Zhang, Q., Yang, C., 2019. Microplastics in surface waters and sediments of the Wei River, in the northwest of China. *Sci. Total Environ.* 667, 427–434. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.332>
- Dovidat, L.C., Brinkmann, B.W., Vijver, M.G., Bosker, T., 2020. Plastic particles adsorb to the roots of freshwater vascular plant *Spirodela polyrhiza* but do not impair growth. *Limnol. Oceanogr. Lett.* 5, 37–45. <https://doi.org/10.1002/lol2.10118>
- Dris, R., Imhof, H., Sanchez, W., Gasperi, J., Galgani, F., Tassin, B., Laforsch, C., 2015. Beyond the ocean: contamination of freshwater ecosystems with (micro-)plastic particles. *Environ. Chem.* 12, 539. <https://doi.org/10.1071/EN14172>
- Dris, R., Imhof, H.K., Löder, M.G.J., Gasperi, J., Laforsch, C., Tassin, B., 2018. Microplastic contamination in freshwater systems: Methodological challenges, occurrence and sources, in: *Microplastic Contamination in Aquatic Environments: An Emerging Matter of Environmental Urgency*. Elsevier, pp. 51–93. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813747-5.00003-5>
- El, N.H., Daud, A., Tahir, A., Mallongi, A., Amqam, H., Salam, A., 2020. Microplastic Exposure through Mussels Consumption in the Coastal Area Community of Pa'lalakkang Village, Galesong, Takalar District. *South Asian Res. J. Biol. Appl. Biosci.* 2, 109–113. <https://doi.org/10.36346/sarjbab.2020.v02i05.003>
- Eo, S., Hong, S.H., Song, Y.K., Han, G.M., Shim, W.J., 2019. Spatiotemporal distribution and annual load of microplastics in the Nakdong River, South Korea. *Water Res.* 160, 228–237. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.053>
- Fan, Y., Zheng, K., Zhu, Z., Chen, G., Peng, X., 2019. Distribution, sedimentary record, and persistence of microplastics in the Pearl River catchment, China. *Environ. Pollut.* 251, 862–870. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.056>
- Fenton, J., 2008. Obstacles in Streams and Their Roles as Hydraulic Structures. *Hydraul. Struct.* 15–22. <https://doi.org/10.1400/177056>

- Ferreira, G.V.B., Barletta, M., Lima, A.R.A., Morley, S.A., Justino, A.K.S., Costa, M.F., 2018. High intake rates of microplastics in a Western Atlantic predatory fish, and insights of a direct fishery effect. *Environ. Pollut.* 236, 706–717. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.095>
- Firdaus-Nawi, M., Zamri-Saad, M., 2016. Major components of fish immunity: A review. *Pertanika J. Trop. Agric. Sci.* 39, 393–420.
- Firdaus, M., Trihadiningrum, Y., Lestari, P., 2020. Microplastic pollution in the sediment of Jagir Estuary, Surabaya City, Indonesia. *Mar. Pollut. Bull.* 150, 110790. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110790>
- Foekema, E.M., Gruijter, C. De, Mergia, M.T., Franeker, J.A. Van, Murk, A.J., Koelmans, A.A., 2013. Plastic in North Sea Fish. *Environmental Sci. Technol.* 47, 8818–8824. <https://doi.org/10.1021/es400931b>
- Frias, J.P.G.L., Nash, R., 2019. Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Mar. Pollut. Bull.* 138, 145–147. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.022>
- Froese, R., Pauly, D., 2019. FishBase. World Wide Web electronic publication. www.fishbase.org (04/2019)
- Froese, R., Pauly, D., 2020. FishBase. World Wide Web electronic publication. www.fishbase.org (02/2020)
- Fujaya, Y., 2004. Fisiologi ikan dasar pengembangan teknik perikanan. Rineka Cipta, Jakarta.
- Galloway, T.S., 2015. Micro- and Nano-plastics and Human Health, in: Bergmann, M. (Ed.), *Marine Anthropogenic Litter*. Springer International Publishing, New York, pp. 343–366. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_13
- Garcia, T.D., Cardozo, A.L.P., Quirino, B.A., Yofukuji, K.Y., Ganassin, M.J.M., dos Santos, N.C.L., Fugi, R., 2020. Ingestion of Microplastic by Fish of Different Feeding Habits in Urbanized and Non-urbanized Streams in Southern Brazil. *Water. Air. Soil Pollut.* 231. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04802-9>
- GESAMP, 2019. Guidelines for the monitoring and assessment of plastic litter in the ocean (Kershaw P.J., Turra A. and Galgani F. editors), (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP/ISA Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, Rep. Stud. GESAMP.
- Geyer, R., Jambeck, J.R., Law, K.L., 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 3, e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Goodsell, P.J., Underwood, A.J., Chapman, M.G., 2009. Evidence necessary for taxa to be reliable indicators of environmental conditions or impacts. *Mar. Pollut. Bull.* 58, 323–331. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.10.011>
- Govender, J., Naidoo, T., Rajkaran, A., Cebekhulu, S., Bhugeloo, A., Sershen, 2020. Towards Characterising Microplastic Abundance, Typology and Retention in Mangrove-Dominated Estuaries. *Water* 12, 1–24.
- Han, M., Niu, X., Tang, M., Zhang, B., Wang, G., Yue, W., Kong, X., Zhu, J., 2020. Distribution of microplastics in surface water of the lower Yellow River near estuary. *Sci. Total Environ.* 707, 135601. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135601>
- Hastuti, A.R., Lumbanbatu, D.T.F., Wardiatno, Y., 2019. The presence of microplastics in the digestive tract of commercial fishes off pantai Indah Kapuk coast, Jakarta, Indonesia. *Biodiversitas* 20, 1233–1242. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d200513>
- Heil, M., Land, W.G., 2014. Danger signals – Damaged-self recognition across the tree of life. *Front. Plant Sci.* 5, 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00578>
- Herawati, H., 2004. Studi kebiasaan makan pada ikan hasil tangkapan di waduk cirata. Universitas Padjadjaran.

- 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. *Environ. Sci. Technol.* 46, 3060–3075. <https://doi.org/10.1021/es2031505>
- Hitchcock, J.N., Mitrovic, S.M., 2019. Microplastic pollution in estuaries across a gradient of human impact. *Environ. Pollut.* 247, 457–466. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.069>
- Imhof, H.K., Laforsch, C., Wiesheu, A.C., Schmid, J., Anger, P.M., Niessner, R., Ivleva, N.P., 2016. Pigments and plastic in limnetic ecosystems: A qualitative and quantitative study on microparticles of different size classes. *Water Res.* 98, 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.015>
- Jabeen, K., Su, L., Li, J., Yang, D., Tong, C., Mu, J., Shi, H., 2017. Microplastics and mesoplastics in fish from coastal and fresh waters of China. *Environ. Pollut.* 221, 141–149. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.11.055>
- Jabeen, K., Li, B., Chen, Q., Su, L., Wu, C., Hollert, H., Shi, H., 2018. Effects of virgin microplastics on goldfish (*Carassius auratus*). *Chemosphere.* <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.031>
- Jackson, G., Buxton, N., George, M., 2000. Diet of the southern opah *Lampris immaculatus* on the Patagonian Shelf; the significance of the squid *Moroteuthis ingens* and anthropogenic plastic. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 206, 261–271. <https://doi.org/10.3354/meps206261>
- 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* (80-). 347, 768–771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- Jiang, C., Yin, L., Li, Z., Wen, X., Luo, X., Hu, S., Yang, H., Long, Y., Deng, B., Huang, L., Liu, Y., 2019. Microplastic pollution in the rivers of the Tibet Plateau. *Environ. Pollut.* 249, 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.022>
- Jovanovi, B., Gökda, K., Güven, O., Emre, Y., Whitley, E.M., 2018. Virgin microplastics are not causing imminent harm to fish after dietary exposure 130, 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.03.016>
- Kalčíková, G., Žgajnar Gotvajn, A., Kladnik, A., Jemec, A., 2017. Impact of polyethylene microbeads on the floating freshwater plant duckweed *Lemna minor*. *Environ. Pollut.* 230, 1108–1115. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.050>
- Kalčíková, G., 2020. Aquatic vascular plants – A forgotten piece of nature in microplastic research. *Environ. Pollut.* 262. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114354>
- Kataoka, T., Nihei, Y., Kudou, K., Hinata, H., 2019. Assessment of the sources and inflow processes of microplastics in the river environments of Japan. *Environ. Pollut.* 244, 958–965. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.111>
- Kementerian Kelautan dan Perikanan, 2018. Kelautan dan Perikanan Dalam Angka [WWW Document]. URL <https://kkp.go.id/setjen/satudata/page/1453-kelautan-dan-perikanan-dalam-angka> (accessed 2.17.21).
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2019. Indonesia National Waste Management Information System [WWW Document]. URL <http://sipsn.menlhk.go.id/> (accessed 7.15.19).
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Indonesia, 2021. Waste Management Information System [WWW Document]. URL sipsn.menlhk.go.id (accessed 6.17.21).
- Khidr, B.M., Mekki, I.A.A., Harabawy, A.S.A., Ohaida, A.S.M.I., 2012. Effect of lead nitrate on the liver of the cichlid fish (*Oreochromis niloticus*): a light microscope study. *Pakistan J. Biol. Sci.* 15, 854–862.
- Kirstein, I. V., Kirmizi, S., Wichels, A., Garin-Fernandez, A., Erler, R., Löder, M., Gerdt, G., 2016. Dangerous hitchhikers? Evidence for potentially pathogenic *Vibrio* spp.

- on microplastic particles. *Mar. Environ. Res.* 120, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.07.004>
- Klein, S., 2015. *Microplastics in Freshwater Systems : Analysis , Occurrence , and Sorption of Organic Contaminants*. Technische Universität Dresden.
- Koppang, E., Fischer, U., Satoh, M., Jirillo, E., 2007. Inflammation in Fish As Seen from A Morphological Point of View with Special Reference to the Vascular Compartment. *Curr. Pharm. Des.* 13, 3649–3655. <https://doi.org/10.2174/138161207783018644>
- Lamb, J.B., Willis, B.L., Fiorenza, E.A., Couch, C.S., Howard, R., Rader, D.N., True, J.D., Kelly, L.A., Ahmad, A., Jompa, J., Harvell, C.D., 2018. Plastic waste associated with disease on coral reefs. *Science* (80-). 359, 460–462. <https://doi.org/10.1126/science.aar3320>
- Land, M.F., Colac, D., Osorio, D.C., Colac, D., 2011. Marine optics: Dark disguise. *Curr. Biol.* 21, 918–920. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.10.009>
- Lebreton, L.C.M., van der Zwet, J., Damsteeg, J.-W., Slat, B., Andrady, A., Reisser, J., 2017. River plastic emissions to the world’s oceans. *Nat. Commun.* 8, 15611. <https://doi.org/10.1038/ncomms15611>
- Lestari, P., Trihadiningrum, Y., 2019. The impact of improper solid waste management to plastic pollution in Indonesian coast and marine environment. *Mar. Pollut. Bull.* 149, 110505. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110505>
- Lestari, P., Trihadiningrum, Y., Wijaya, B.A., Yunus, K.A., Firdaus, M., 2020. Distribution of microplastics in Surabaya River, Indonesia. *Sci. Total Environ.* 726, 138560. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138560>
- Li, B., Su, L., Zhang, H., Deng, H., Chen, Q., Shi, H., 2020. Microplastics in fishes and their living environments surrounding a plastic production area. *Sci. Total Environ.* 727, 138662. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138662>
- Li, J., Yang, D., Li, L., Jabeen, K., Shi, H., 2015. Microplastics in commercial bivalves from China. *Environ. Pollut.* 207, 190–195. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.09.018>
- Li, J., Lusher, A.L., Rotchell, J.M., Deudero, S., Turra, A., Bråte, I.L.N., Sun, C., Shahadat Hossain, M., Li, Q., Kolandhasamy, P., Shi, H., 2019. Using mussel as a global bioindicator of coastal microplastic pollution. *Environ. Pollut.* 244, 522–533. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.032>
- Li, L.L., Amara, R., Souissi, S., Dehaut, A., Duflos, G., Monchy, S., 2020. Impacts of microplastics exposure on mussel (*Mytilus edulis*) gut microbiota. *Sci. Total Environ.* 745. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141018>
- Lieschke, G.J., Trede, N.S., 1993. Fish immunology. *Curr. Biol.* 19, 1–5. [https://doi.org/10.1016/0165-2427\(93\)90147-v](https://doi.org/10.1016/0165-2427(93)90147-v)
- Lim, L.-S., Tan, S.-Y., Tuzan, A.D., Kawamura, G., Mustafa, S., Rahmah, S., Liew, H.J., 2020. Diel osmorepiration rhythms of juvenile marble goby (*Oxyeleotris marmorata*). *Fish Physiol. Biochem.* 46, 1621–1629. <https://doi.org/10.1007/s10695-020-00817-5>
- Liu, K., Wang, X., Song, Z., Wei, N., Ye, H., Cong, X., Zhao, L., Li, Y., Qu, L., Zhu, L., Zhang, F., Zong, C., Jiang, C., Li, D., 2020. Global inventory of atmospheric fibrous microplastics input into the ocean: An implication from the indoor origin. *J. Hazard. Mater.* 400, 123223. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123223>
- Lopa, R.T., Maricar, F., Sutrisno, 2015. *Study on Tallo River Potency as River Navigation (in Bahasa)*. Hasanuddin University.
- Lusher, A.L.L., McHugh, M., Thompson, R.C.C., 2013. Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tract of pelagic and demersal fish from the English Channel. *Mar. Pollut. Bull.* 67, 94–99. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.11.028>

- Lusher, A.L., O'Donnell, C., Officer, R., O'Connor, I., 2016. Microplastic interactions with North Atlantic mesopelagic fish. *ICES J. Mar. Sci.* 73, 1214–1225. <https://doi.org/10.4135/9781412953924.n678>
- Lusher, A., Hollman, P., Mandoza-Hill, J., 2017a. Microplastics in fisheries and aquaculture, FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper.
- Lusher, A.L., Welden, N.A., Sobral, P., Cole, M., 2017b. Sampling, isolating and identifying microplastics ingested by fish and invertebrates. *Anal. Methods* 9, 1346–1360. <https://doi.org/10.1039/C6AY02415G>
- Manalu, A.A., Hariyadi, S., Wardiatno, Y., 2017. Microplastics abundance in coastal sediments of Jakarta Bay, Indonesia. *AAFL Bioflux* 10, 1164–1173.
- Mani, T., Hauk, A., Walter, U., Burkhardt-Holm, P., 2016. Microplastics profile along the Rhine River. *Sci. Rep.* 5, 17988. <https://doi.org/10.1038/srep17988>
- Mateos-Cárdenas, A., Scott, D.T., Seitmaganbetova, G., van, van P., John, O.H., Marcel A.K., J., 2019. Polyethylene microplastics adhere to *Lemna minor* (L.), yet have no effects on plant growth or feeding by *Gammarus duebeni* (Lillj.). *Sci. Total Environ.* 689, 413–421. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.359>
- Mato, Y., Isobe, T., Takada, H., Kanehiro, H., Ohtake, C., Kaminuma, T., 2001. Plastic Resin Pellets as a Transport Medium for Toxic Chemicals in the Marine Environment. *Environ. Sci. Technol.* 35, 318–324. <https://doi.org/10.1021/es0010498>
- Mawaddha, R., Firdaus, Tahir, A., 2020. Studies of Micro Plastics contamination on mussels, seawater, and sediment at Sanrobengi Island of South Sulawesi. *Adv. Environ. Biol.* 14, 12–17. <https://doi.org/10.22587/aeb.2020.14.2.2>
- McIlwraith, H.K., Lin, J., Erdle, L.M., Mallos, N., Diamond, M.L., Rochman, C.M., 2019. Capturing microfibers – marketed technologies reduce microfiber emissions from washing machines. *Mar. Pollut. Bull.* 139, 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.12.012>
- McNeish, R.E., Kim, L.H., Barrett, H.A., Mason, S.A., Kelly, J.J., Hoellein, T.J., 2018. Microplastic in riverine fish is connected to species traits. *Sci. Rep.* 8, 11639. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-29980-9>
- Moore, C., Moore, S., Leecaster, M., Weisberg, S., 2001. A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre. *Mar. Pollut. Bull.* 42, 1297–1300. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X)
- Morrison, J., Smith, C., Heidel, J., Mumford, S., Blazer, V., Blazer, E., 2014. *Fish Histology and Histopathology Manual*.
- Munno, K., Helm, P.A., Jackson, D.A., Rochman, C., Sims, A., 2018. Impacts of temperature and selected chemical digestion methods on microplastic particles. *Environ. Toxicol. Chem.* 37, 91–98. <https://doi.org/10.1002/etc.3935>
- Najamuddin, Prartono, T., Sanusi, H.S., Nurjaya, I.W., 2016. Seasonal distribution and geochemical fractionation of heavy metals from surface sediment in a tropical estuary of Jeneberang River, Indonesia. *Mar. Pollut. Bull.* 111, 456–462. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.106>
- Napper, I.E., Thompson, R.C., 2016. Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions. *Mar. Pollut. Bull.* 112, 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.09.025>
- Ory, N.C., Sobral, P., Ferreira, J.L., Thiel, M., 2017. Amberstripe scad *Decapterus muroadsi* (Carangidae) fish ingest blue microplastics resembling their copepod prey along the coast of Rapa Nui (Easter Island) in the South Pacific subtropical gyre. *Sci. Total Environ.* 586, 430–437. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.175>

- Pe, E.O.L., Mashar, A., Taryono, Wardiatno, Y., 2020. Microplastic distribution and abundance in cimandiri watershed flowing to Palabuhanratu Bay, Sukabumi, West Java, Indonesia. *AACL Bioflux* 13, 657–668.
- Permono, R.A., 2018. *Mengenal Polimer dan Polimerisasi*, Edisi kedua. ed. UGM Press, Yogyakarta.
- Possatto, F.E., Barletta, M., Costa, M.F., Ivar, J.A., Dantas, D. V, 2011. Plastic debris ingestion by marine catfish : An unexpected fisheries impact. *Mar. Pollut. Bull.* 62, 1098–1102. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.01.036>
- Purba, N.P., Handyman, D.I.W., Pribadi, T.D., Syakti, A.D., Pranowo, W.S., Harvey, A., Ihsan, Y.N., 2019. Marine debris in Indonesia: A review of research and status. *Mar. Pollut. Bull.* 146, 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.05.057>
- Purwiyanto, A.I.S., Suteja, Y., Trisno, Ningrum, P.S., Putri, W.A.E., Rozirwan, Agustriani, F., Fauziyah, Cordova, M.R., Koropitan, A.F., 2020. Concentration and adsorption of Pb and Cu in microplastics: Case study in aquatic environment. *Mar. Pollut. Bull.* 158, 111380. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111380>
- Rahman, Yulianda, F., Effendi, H., Rusmana, I., Wardiatno, Y., 2018. Fluks Gas Rumah Kaca CO₂, CH₄ dan N₂O pada Lahan Ekosistem Mangrove di Sungai Tallo, Makassar. *J. Biol. Trop.* 2, 149–158.
- Renner, G., Schmidt, T.C., Schram, J.J., 2017. *Characterization and Quantification of Microplastics by Infrared Spectroscopy*, *Comprehensive Analytical Chemistry: Characterization and Analysis of Microplastics*. Elsevier, Amsterdam.
- Roch, S., Friedrich, C., Brinker, A., 2020. Uptake routes of microplastics in fishes: practical and theoretical approaches to test existing theories. *Sci. Rep.* 10, 3896. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60630-1>
- Rochman, C.M., Hoh, E., Kurobe, T., Teh, S.J., 2013. Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. *Sci. Rep.* 3, 1–7. <https://doi.org/10.1038/srep03263>
- Rochman, C.M., Kurobe, T., Flores, I., Teh, S.J., 2014. Early warning signs of endocrine disruption in adult fish from the ingestion of polyethylene with and without sorbed chemical pollutants from the marine environment. *Sci. Total Environ.* 493, 656–661. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.051>
- Rochman, C.M., 2015. The Complex Mixture, Fate and Toxicity of Chemicals Associated with Plastic Debris in the Marine Environment, in: Bergman, M., Gutow, L., Klages, M. (Eds.), *Marine Anthropogenic Litter*. Springer International Publishing, Cham, pp. 117–140. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_5
- Rochman, C.M., Tahir, A., Williams, S.L., Baxa, D. V., Lam, R., Miller, J.T., Teh, F.-C., Werorilangi, S., Teh, S.J., 2015. Anthropogenic debris in seafood: Plastic debris and fibers from textiles in fish and bivalves sold for human consumption. *Sci. Rep.* 5, 14340. <https://doi.org/10.1038/srep14340>
- Rochman, C.M., 2020. The Story of Plastic Pollution. *Oceanography* 33, 115–147. https://doi.org/10.1142/9781786347435_0005
- Rodríguez-Seijo, A., Pereira, R., 2017. Morphological and Physical Characterization of Microplastics. pp. 49–66. <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2016.10.007>
- Santillo, D., Miller, K., Johnston, P., 2017. Microplastics as contaminants in commercially important seafood species. *Integr. Environ. Assess. Manag.* 13, 516–521. <https://doi.org/10.1002/ieam.1909>
- Saputri, D. F. I., 2020. Microplastic depuration on *Asaphis Detlorata*. *International Journal Papier advance and scientific review.* 1, 37-46
- Sarkar, D.J., Das Sarkar, S., Das, B.K., Manna, R.K., Behera, B.K., Samanta, S., 2019. Spatial distribution of meso and microplastics in the sediments of river Ganga at

- eastern India. *Sci. Total Environ.* 694, 133712. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133712>
- Schreyers, L., Emmerik, T. van, Nguyen, T.L., Castrop, E., Phung, N., Kieu-Le, T.-C., Strady, E., Biermann, L., Ploeg, M.J. van der, 2021. Plastic plants: The role of water hyacinths in plastic transport in tropical rivers. *Front. Environ. Sci.* <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.686334>
- Seibel, H., Baßmann, B., Rebl, A., 2021. Blood Will Tell: What Hematological Analyses Can Reveal About Fish Welfare. *Front. Vet. Sci.* 8, 1–21. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.616955>
- Sembinging, E., Fareza, A.A., Suendo, V., Reza, M., 2020. The Presence of Microplastics in Water, Sediment, and Milkfish (*Chanos chanos*) at the Downstream Area of Citarum River, Indonesia. *Water, Air, Soil Pollut.* 231, 355. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04710-y>
- Sendra, M., Pintado-Herrera, M.G., Aguirre-Martínez, G.V., Moreno-Garrido, I., Martín-Díaz, L.M., Lara-Martín, P.A., J, B., 2017. Are the TiO₂ NPs a “Trojan horse” for personal care products (PCPs) in the clam *Ruditapes philippinarum*? *Chemosphere* 185, 192–204. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.009>
- Sendra, M., Sparaventi, E., Novoa, B., Figueras, A., 2021. An overview of the internalization and effects of microplastics and nanoplastics as pollutants of emerging concern in bivalves. *Sci. Total Environ.* 753, 142024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142024>
- Shuker, L.H., Cadman, C.A., 2018. Indonesia Marine debris hotspot rapid assessment : synthesis report. Worldbank. Washington, D.C.
- Silva-Cavalcanti, J.S., Silva, J.D.B., França, E.J. de, Araújo, M.C.B. de, Gusmão, F., 2017. Microplastics ingestion by a common tropical freshwater fishing resource. *Environ. Pollut.* 221, 218–226. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.11.068>
- Smith, N.C., Rise, M.L., Christian, S.L., 2019. A Comparison of the Innate and Adaptive Immune Systems in Cartilaginous Fish, Ray-Finned Fish, and Lobe-Finned Fish. *Front. Immunol.* 10. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2019.02292>
- Su, L., Cai, H., Kolandhasamy, P., Wu, C., Rochman, C.M., Shi, H., 2018. Using the Asian clam as an indicator of microplastic pollution in freshwater ecosystems. *Environ. Pollut.* 234, 347–355. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.075>
- Sudirman, Baskoro, M.S., Taurusman, A.M.A., 2011. *Tingkah Laku Ikan: Hubungannya dengan Ilmu dan Teknologi Perikanan Tangkap*. Lubuk Agung, Bandung.
- Syakti, A.D., Bouhroum, R., Hidayati, N.V., Koenawan, C.J., Boulkamh, A., Sulisty, I., Lebarillier, S., Akhlus, S., Doumenq, P., Wong-Wah-Chung, P., 2017. Beach macro-litter monitoring and floating microplastic in a coastal area of Indonesia. *Mar. Pollut. Bull.* 122, 217–225. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.046>
- Tahir, A., Rochman, C.M., 2014. Plastic Particles in Silverside (*Stolephorus heterolobus*) Collected at Paotere Fish Market, Makassar. *Int. J. Agric. Syst.* 2, 163–168. <https://doi.org/10.20956/ijas.v2i2.32>
- Tahir, A., Samawi, M.F., Sari, K., Hidayat, R., Nimzet, R., Wicaksono, E.A., Asrul, L., Werorilangi, S., 2019a. Studies on microplastic contamination in seagrass beds at Spermonde Archipelago of Makassar Strait, Indonesia. *J. Phys. Conf. Ser.* 1341, 022008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1341/2/022008>
- Tahir, A., Taba, P., Samawi, M.F., Werorilangi, S., 2019b. Microplastics in water, sediment and salts from traditional salt producing ponds. *Glob. J. Environ. Sci. Manag.* 5, 431–440. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2019.04.03>
- Tahir, A., Soeprapto, D.A., Sari, K., Wicaksono, E.A., Werorilangi, S., 2020. Microplastic assessment in Seagrass ecosystem at Kodingareng Lompo Island of Makassar

- City. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 564, 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/564/1/012032>
- Thamrin, M., Ramli, M., Widodo, S., Kadir, J., 2018. Penentuan Kualitas Air Sungai Jeneberang Dengan Metode Indeks Pencemar, di Kabupaten Gowa Propinsi Sulawesi Selatan, in: Prosiding Seminar Ilmiah Nasional Sains Dan Teknologi. pp. 259–266.
- Thompson, R.C., Olson, Y., Mitchell, R.P., Davis, A., Rowland, S.J., John, A.W.G., McGonigle, D., Russell, A.E., 2004. Lost at Sea: Where Is All the Plastic? *Science* (80-.). 304, 838. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>
- Thompson, R.C., Moore, C.J., Saal, F.S.V., Swan, S.H., 2009. Plastics, the environment and human health: Current consensus and future trends. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 364, 2153–2166. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0053>
- Trevisan, R., Uzochukwu, D., Di Giulio, R.T., 2020. PAH Sorption to Nanoplastics and the Trojan Horse Effect as Drivers of Mitochondrial Toxicity and PAH Localization in Zebrafish. *Front. Environ. Sci.* 8, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00078>
- van Wijnen, J., Ragas, A.M.J., Kroeze, C., 2019. Modelling global river export of microplastics to the marine environment: Sources and future trends. *Sci. Total Environ.* 673, 392–401. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.078>
- Vendel, A.L., Bessa, F., Alves, V.E.N., Amorim, A.L.A., Patrício, J., Palma, A.R.T., 2017. Widespread microplastic ingestion by fish assemblages in tropical estuaries subjected to anthropogenic pressures. *Mar. Pollut. Bull.* 117, 448–455. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.081>
- Viršek, M.K., Lovšin, M.N., Koren, Š., Kržan, A., Peterlin, M., 2017. Microplastics as a vector for the transport of the bacterial fish pathogen species *Aeromonas salmonicida*. *Mar. Pollut. Bull.* 125, 301–309. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.08.024>
- Vriend, P., Hidayat, H., van Leeuwen, J., Cordova, M.R., Purba, N.P., Löhr, A.J., Faizal, I., Ningsih, N.S., Agustina, K., Husrin, S., Suryono, D.D., Hantoro, I., Widianarko, B., Lestari, P., Vermeulen, B., van Emmerik, T., 2021. Plastic Pollution Research in Indonesia: State of Science and Future Research Directions to Reduce Impacts. *Front. Environ. Sci.* 9, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.692907>
- Wakkaf, T., El Zrelli, R., Kedzierski, M., Balti, R., Shaiek, M., Mansour, L., Tlig-Zouari, S., Bruzard, S., Rabaoui, L., 2020. Microplastics in edible mussels from a southern Mediterranean lagoon: Preliminary results on seawater-mussel transfer and implications for environmental protection and seafood safety. *Mar. Pollut. Bull.* 158. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111355>
- Walkinshaw, C., Lindeque, P.K., Thompson, R., Tolhurst, T., Cole, M., 2020. Microplastics and seafood: lower trophic organisms at highest risk of contamination. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 190, 110066. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110066>
- Wang, C., Xing, R., Sun, M., Ling, W., Shi, W., Cui, S., An, L., 2020. Microplastics profile in a typical urban river in Beijing. *Sci. Total Environ.* 743, 140708. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140708>
- Wang, F., Wong, C.S., Chen, D., Lu, X., Wang, Fei, Zeng, E.Y., 2018. Interaction of toxic chemicals with microplastics: A critical review. *Water Res.* 139, 208–219. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.04.003>
- Wang, G., Lu, J., Wanjie, L., Ning, J., Zhou, Li., Tong, Y., Liu, Z., Zhou, H., Xiayihazi, N., 2021. Seasonal variation and risk assessment of microplastics in surface water of the manas river basin, China. *Ecotoxicology and env. Safety.* 208, 1114777. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111477>

- Wang, S., Zhang, C., Pan, Z., Sun, D., Zhou, A., Xie, S., Wang, J., Zou, J., 2020. Microplastics in wild freshwater fish of different feeding habits from Beijiang and Pearl River Delta regions, south China. *Chemosphere* 258, 127345. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127345>
- Wang, X., Li, C., Liu, K., Zhu, L., Song, Z., Li, D., 2020. Atmospheric microplastic over the South China Sea and East Indian Ocean: abundance, distribution and source. *J. Hazard. Mater.* 389, 121846. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121846>
- Watkins, L., McGrattan, S., Sullivan, P.J., Walter, M.T., 2019. The effect of dams on river transport of microplastic pollution. *Sci. Total Environ.* 664, 834–840. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.028>
- Werorilangi, S., Noor, A., Samawi, M.F., Faizal, A., Tahir, A., 2019. Sebaran spasial logam pb, cd, cu, zn dan fraksi geokimia di sedimen perairan pantai kota makassar. *J. Ilmu Kelaut. SPERMONDE* 5, 21–28. <https://doi.org/10.20956/jiks.v5i1.7029>
- White, W.T., Last, P.R., Dharmadi, Faizah R., Chodrijah U., Prisantoso, B.I., Pogonoski J. J., Puckridge, M., Blaber, S. J. M., 2013. Market fish in Indonesia. ACIAR Monograph no. 155. Australian Centre for International Agricultural Research: Canberra. 438 p.
- Wicaksono, E.A., Sriati, Lili, W., 2016. Sebaran Logam Berat Timbal (Pb) Pada Makrozoobenthos di Perairan Waduk Cirata, Provinsi Jawa Barat. *J. Perikan. Kelaut.* VII, 103–114.
- Wicaksono, E.A., Tahir, A., Werorilangi, S., 2020. Preliminary study on microplastic pollution in surface-water at Tallo and Jeneberang Estuary , Makassar, Indonesia. *AACL Bioflux* 13, 902–909.
- Wicaksono, E.A., Werorilangi, S., Galloway, T.S., Tahir, A., 2021a. Distribution and Seasonal Variation of Microplastics in Tallo River, Makassar, Eastern Indonesia. *Toxics* 9, 129. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/toxics9060129>
- Wicaksono, E.A., Werorilangi, S., Tahir, A., 2021b. The influence of weirs on microplastic fate in the riverine environment (case study : Jeneberang River , Makassar City , Indonesia). *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 763, 1–7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/763/1/012054>
- Wijaya, B.A., Trihadiningrum, Y., 2019. Pencemaran Meso- dan Mikroplastik di Kali Surabaya pada Segmen Driyorejo hingga Karang Pilang. *J. Tek. ITS* 8, 2–7.
- Wright, S.L., Rowe, D., Thompson, R.C., Galloway, T.S., 2013a. Microplastic ingestion decreases energy reserves in marine worms. *Curr. Biol.* 23, R1031–R1033. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.10.068>
- Wright, S.L., Thompson, R.C., Galloway, T.S., 2013b. The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review. *Environ. Pollut.* 178, 483–492. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.031>
- Wright, S.L., Ulke, J., Font, A., Chan, K.L.A., Kelly, F.J., 2020. Atmospheric microplastic deposition in an urban environment and an evaluation of transport. *Environ. Int.* 136, 105411. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105411>
- Wu, P., Tang, Y., Dang, M., Wang, S., Jin, H., Liu, Y., Jing, H., Zheng, C., Yi, S., Cai, Z., 2020. Spatial-temporal distribution of microplastics in surface water and sediments of Maozhou River within Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Sci. Total Environ.* 717, 135187. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135187>
- Xiong, X., Chen, X., Zhang, K., Mei, Z., Hao, Y., Zheng, J., Wu, C., Wang, K., Ruan, Y., Lam, P.K.S., Wang, D., 2018. Microplastics in the intestinal tracts of East Asian finless porpoises (*Neophocaena asiaeorientalis sunameri*) from Yellow Sea and

- Bohai Sea of China. *Mar. Pollut. Bull.* 136, 55–60.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.09.006>
- Yaqin, K., 2019. *Petunjuk praktis aplikasi biomarker sederhana*. UPT UNHAS PRESS, Makassar.
- Zhou, Q., Tu, C., Fu, C., Li, Y., Zhang, H., Xiong, K., Zhao, X., Li, L., Waniek, J.J., Luo, Y., 2020. Characteristics and distribution of microplastics in the coastal mangrove sediments of China. *Sci. Total Environ.* 703, 134807.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134807>

LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Curah Hujan Kota Makassar Tahun 2019

Bulan	Jumlah Curah Hujan (mm)	Jumlah Hari Hujan (Hari)	Penyinaran Matahari (%)
Januari	642	28	36
Februari	239	24	62
Maret	445	22	57
April	354	22	67
Mei	60	5	81
Juni	61	13	62
Juli	2	4	88
Agustus	0	2	97
September	-	-	97
Oktober	-	-	98
November	78	8	90
Desember	281	23	69

Sumber: Balai Besar Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Wilayah IV Makassar

Lampiran 2. Koordinat dan Keadaan Umum Titik Pengambilan Sampel

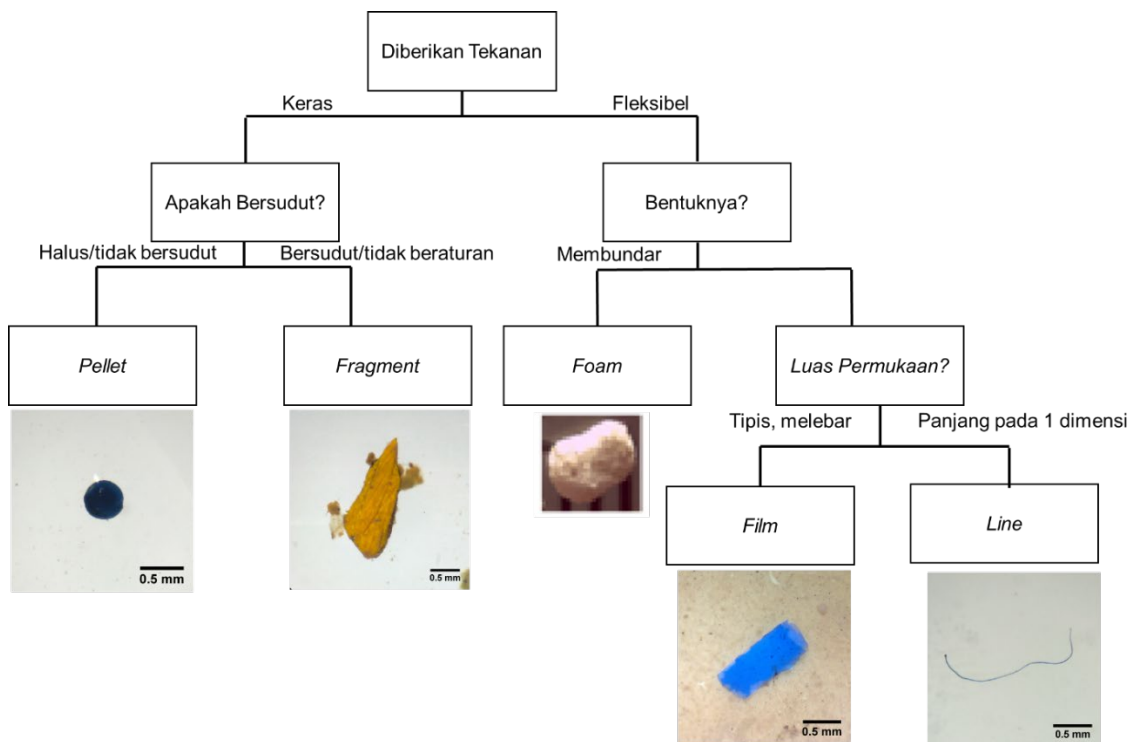
Stasiun	Koordinat	Kondisi sempadan sungai
T-1	-5.1428029, 119.4846912	Bakau, didominasi <i>Nypa fruticans</i>
T-2	-5.1415835, 119.4772392	Bakau, didominasi <i>Nypa fruticans</i> . Bersebelahan dengan keramba jaring apung
T-3	-5.1234475, 119.4799398	Bakau, didominasi <i>Nypa fruticans</i> . Bersebelahan dengan dermaga penyebrangan dan lokasi pemukiman kera-kera
T-4	-5.1192363, 119.4675322	Bakau, didominasi <i>Nypa fruticans</i> . Bersebelahan dengan Dermaga dan pemukiman Lakkang
T-5	-5.1142075, 119.4466198	Bakau, didominasi <i>Nypa fruticans</i> dan <i>Rhizophora sp.</i> Mendapat aliran air langsung dari kanal pampang
T-6	-5.1026818, 119.4497193	Bakau pada sempadan utara dan konstruksi semen pada sempadan di selatan. Bersebelahan dengan pemukiman nelayan dan pabrik, berlokasi di muara sungai Tallo
J-1	-5.2276382, 119.4897522	Vegetasi natural, bersebelahan dengan area persawahan
J-2	-5.2073008, 119.4473039	Tanggul pasir, dekat dengan lokasi berkumpulnya eceng gondok. Dekat dengan lingkungan pemukiman Sungguminasa
J-3	-5.1919415, 119.4401131	Tanggul pasir, dekat dengan dermaga penyebrangan perahu kayu. Ramai aktivitas penyebrangan sungai dengan perahu kayu
J-4	-5.1934893, 119.4231758	Tanggul pasir, bersebelahan dengan tempat pembuangan sampah sementara di Kab. Gowa
J-5	-5.1941977, 119.4102654	Tanggul Semen. Dekat dengan Bendungan Karet. Bersebelahan dengan persawahan
J-6	-5.1919596, 119.3834117	Tanggul semen dan bebatuan, berada di muara sungai Jeneberang.

Lampiran 3. Kriteria Identifikasi Mikroplastik

Pengamatan mikroplastik dilakukan oleh pengamat mikroplastik yang sudah terlatih dengan pengalaman pengamatan MP setidaknya 2 tahun. Kemampuan dari pengamat MP sangat mempengaruhi ketepatan dalam proses pengamatan visual MP (Isobe et al. 2019). Ciri-ciri suatu partikel termasuk ke dalam MP dicirikan oleh ciri-ciri sebagai berikut:

1. Berukuran kurang dari 5 mm
2. Tidak memiliki inti sel, dinding sel, segmen teratur dan cabang yang merupakan penciri makhluk hidup.
3. Memantulkan cahaya
4. Memiliki warna yang cenderung homogen dan jelas, kontras dengan partikel alam yang didominasi warna kecoklat-an.
5. Memiliki tekstur fleksibel, plastis yang kuat.

Penggolongan bentuk mikroplastik didasarkan pada bagan berikut:



Lampiran 4. Data MP di Lingkungan Sungai Tallo dan Jeneberang

Mikroplastik di Sungai Tallo pada musim hujan

Kompartemen	Stasiun	Jarak Tarik (m)	ulangan	#MP pada filter	Kelimpahan MP	Kelimpahan MP rata-rata
Air (MP/m ³)	T-1	100	1	5	1,11	1,33
			2	5	1,11	
			3	8	1,78	
	T-2	100	1	4	0,89	0,74
			2	1	0,22	
			3	5	1,11	
	T-3	100	1	11	2,44	1,33
			2	5	1,11	
			3	2	0,44	
	T-4	100	1	13	2,89	2,15
			2	9	2,00	
			3	7	1,56	
	T-5	100	1	9	2,00	1,26
			2	4	0,89	
			3	4	0,89	
	T-6	100	1	4	0,89	1,93
			2	12	2,67	
			3	10	2,22	
Sedimen (MP/kg)	T-1		1	3	30,00	43,33
			2	5	50,00	
			3	5	50,00	
	T-2		1	4	40	30,00
			2	2	20	
			3	3	30	
	T-3		1	1	10,00	16,67
			2	4	40,00	
			3	0	0,00	
	T-4		1	7	70,00	40,00
			2	2	20,00	
			3	3	30,00	
	T-5		1	5	50,00	33,33
			2	2	20,00	
			3	3	30,00	
	T-6		1	12	120,00	73,33
			2	5	50,00	
			3	5	50,00	

Mikroplastik di Sungai Tallo pada Musim Kemarau

Kompartemen	Stasiun	Jarak Tarik (m)	ulangan	#MP pada filter	Kelimpahan MP	Kelimpahan MP rata-rata
Air (MP/m ³)	T-1	100	1	15	3,33	1,92
			2	5	1,11	
			3	6	1,33	
	T-2	100	1	8	1,78	1,55
			2	6	1,33	
			3	7	1,55	
	T-3	100	1	8	1,78	2,07
			2	11	2,44	
			3	9	2,00	
	T-4	100	1	9	2,00	2,00
			2	10	2,22	
			3	8	1,78	
	T-5	100	1	16	3,56	2,67
			2	9	2,00	
			3	11	2,44	
	T-6	100	1	15	3,33	3,41
			2	16	3,56	
			3	15	3,33	
Sedimen (MP/kg)	T-1		1	6	60,00	33,33
			2	3	30,00	
			3	1	10,00	
	T-2		1	7	70,00	83,33
			2	6	60,00	
			3	12	120,00	
	T-3		1	4	40,00	50,00
			2	8	80,00	
			3	3	30,00	
	T-4		1	5	50,00	40,00
			2	3	30,00	
			3	4	40,00	
	T-5		1	9	90,00	100
			2	7	70,00	
			3	14	140,00	
	T-6		1	12	120,00	150
			2	19	190,00	
			3	14	140,00	

Mikroplastik di Sungai Jeneberang pada Musim Hujan

Kompartemen	Stasiun	Jarak Tarik (m)	ulangan	#MP pada filter	Kelimpahan MP	Kelimpahan MP rata-rata
Air (MP/m ³)	J-1	100	1	12	2,67	3,04
			2	9	2,00	
			3	20	4,44	
	J-2	160	1	15	2,08	2,64
			2	26	3,61	
			3	16	2,22	
	J-3	150	1	17	2,52	2,42
			2	18	2,67	
			3	14	2,07	
	J-4	180	1	20	2,47	1,69
			2	14	1,73	
			3	7	0,86	
	J-5	230	1	16	1,55	1,55
			2	14	1,35	
			3	18	1,74	
	J-6	230	1	22	2,13	1,58
			2	14	1,35	
			3	13	1,26	
Sedimen (MP/kg)	J-1		1	5	50,00	50,00
			2	6	60,00	
			3	4	40,00	
	J-2		1	7	70,00	40,00
			2	2	20,00	
			3	3	30,00	
	J-3		1	2	20,00	30,00
			2	5	50,00	
			3	2	20,00	
	J-4		1	4	40,00	36,67
			2	5	50,00	
			3	2	20,00	
	J-5		1	2	20,00	20,00
			2	3	30,00	
			3	1	10,00	
	J-6		1	2	20,00	16,67
			2	1	10,00	
			3	2	20,00	

Mikroplastik di Sungai Jeneberang pada musim kemarau

Kompartemen	Stasiun	Jarak Tarik (m)	ulangan	#MP pada filter	Kelimpahan MP	Kelimpahan MP rata-rata
Air (MP/m ³)	J-1	100	1	25	5,56	3,34
			2	13	2,89	
			3	7	1,56	
	J-2	160	1	15	2,08	1,57
			2	13	1,81	
			3	6	0,83	
	J-3	150	1	15	2,22	2,22
			2	16	2,37	
			3	13	1,93	
	J-4	180	1	13	1,60	1,52
			2	10	1,23	
			3	14	1,73	
	J-5	230	1	13	1,44	0,89
			2	5	0,56	
			3	6	0,67	
	J-6	230	1	8	0,77	0,64
			2	7	0,68	
			3	5	0,48	
Sedimen (MP/kg)	J-1		1	6	60,00	63,33
			2	8	80,00	
			3	5	50,00	
	J-2		1	6	60,00	66,67
			2	6	60,00	
			3	8	80,00	
	J-3		1	6	60,00	70,00
			2	6	60,00	
			3	9	90,00	
	J-4		1	2	20,00	36,67
			2	4	40,00	
			3	5	50,00	
	J-5		1	6	60,00	36,67
			2	2	20,00	
			3	3	30,00	
	J-6		1	4	40,00	43,33
			2	5	50,00	
			3	4	40,00	

Lampiran 5. Kebiasaan Makan Ikan

Spesies	Makanan utama ^a	Hasil pengamatan pada sampel	Kecenderungan kebiasaan makan
<i>M. cyprinoides</i>	Ikan dan krustasea	Tulang belakang ikan, otolith, sisik	Karnivor
<i>O. niloticus</i>	Fitoplankton, algae dan detritus	Potongan daun, potongan akar, tumbuhan vaskular	Herbivor
<i>M. cephalus</i>	Detritus, mikroalga dan bentos	Mikroalga dan potongan alga	Herbivor
<i>O. mossambicus</i>	Alga dan fitoplankton	Potongan daun, lumut dan tumbuhan vaskular	Herbivor
<i>B. gonionotus</i>	Berbagai tumbuhan	Daun dan akar	Herbivor
<i>T. trichopterus</i>	Zooplankton, krustasea, larva serangga	Potongan zooplankton	Karnivor
<i>O. marmorata</i>	ikan	Tulang belakang ikan, otolith, sisik	Karnivor
<i>G. aureus</i>	Serangga, udang dan ikan kecil	Zooplankton, otolith, tulang belakang ikan	Karnivor

^aberdasarkan fishbase.se (diakses pada tanggal 07 Februari 2020)

Lampiran 6. Bobot, Ukuran dan Jumlah MP pada Sampel Ikan

Ikan yang ditangkap dari Sungai Tallo

no	Spesies	Nama Lokal	Bobot (g)	TL (cm)	Jumlah MP
1	<i>Oreochromis mossambicus</i>	Mujair	91,1	16,4	4
2			64,4	15,5	0
3			68,8	15,6	0
4			73,5	16	1
5			49,7	13,5	2
6			53,5	14	3
7			39,9	11,3	0
8			42,3	12	0
9			86,2	16	3
10			52,8	13,5	1
11			43,4	12,5	0
12			46,1	13,2	2
13			41,4	12,5	3
14			49,8	13,3	4
15			42,9	12,5	5
16			35,8	11,6	2
17			30,4	12	1
18			27,6	11,4	0
19			26,9	11,4	1
20			28,4	11,5	0
21			40,9	13,2	2
22			26,5	12,5	2
23			32,7	12,2	1
24			32,5	12,6	0
25			32,7	12	1
26			28,1	11,7	1
27	<i>Oreochromis niloticus</i>	Nila	52,9	14,8	2
28			41,8	13,4	0
29			69,4	15,1	3
30			44,5	13,2	1
31			50,2	14	0
32			43,1	14,3	1
33			46,4	13,4	2
34			18,1	10,5	0
35			30,6	12,2	1
36			205	21,3	6
37			211	21	8
38			156	20,3	4
39			227	22	7
40			208	21,4	8
41			252	22,5	1
42			218	21,2	3
43			241	21,3	0
44			216	22	2
45			121	19	0
46			157	19,9	1

47			166	19,5	2
48			305	23,9	1
49			214	21,8	1
50			276	22,9	1
51			256	22,2	0
52			235	21,9	0
53			255	21,9	0
54			277	23,5	0
55			138	19	1
56			258	21,7	1
57			182	20,2	4
58			160,9	22,5	0
59			160,1	21,7	0
60			75,6	17,2	0
61			86,2	18,5	1
62			54,3	16,5	0
63			53,9	16,2	0
64			120,4	20,6	2
65			69	17,9	0
66			64,6	16,8	1
67			70	16,4	1
68			68,3	16,6	2
69			57,4	16,5	2
70			61,6	16,7	0
71			57,6	15,9	2
72			35,4	17,3	1
73			72,8	16,5	0
74	<i>Barbonymus</i>	Tawes	84,5	18	0
75	<i>gonionotus</i>		67,1	16,9	3
76			71,8	17	4
77			67,8	16,1	0
78			73,2	17,3	2
79			67,8	16,1	0
80			51,2	16,2	0
81			40	16,1	1
82			35	15,8	8
83			38	15,9	2
84			47	16,2	2
85			37	15,5	2
86			95	19,2	0
87			75	17,5	1
88			57	17,9	0
89			40	15,8	2
90			35	14,1	2
91			52	16,4	0
92			156,8	26,5	3
93	<i>Megalops</i>	Bulan-bulan	164,1	26,9	5
94	<i>cyprinoides</i>		113,4	26,5	1
95			177,9	23,7	8
96			182,3	26,9	0

97			115,1	23,2	0
98			141,6	24,6	2
99			222,4	29,7	0
100			180,9	27,6	1
101			96,3	22,1	1
102			133,6	25,2	0
103			168,9	26,2	1
104			244,9	30,6	5
105			149,3	27	2
106			10,9	9	6
107			8,4	8,4	1
108			11,5	9,1	0
109			6,4	7,8	2
110			7,4	7,9	0
111			12	9,5	0
112			10,3	8,9	2
113			10	9	0
114			6,5	7,7	1
115			12,3	9,4	0
116			10	8,5	2
117			11,2	8,9	0
118	<i>Trichopodus trichopterus</i>	Sepat rawa	11,2	9,2	0
119			8,9	8,4	0
120			6,9	8,4	0
121			12	10,1	1
122			7,2	8,4	0
123			9,5	8,7	0
124			9,3	8,9	2
125			11,5	9,4	0
126			7,3	8,5	0
127			8,7	8,5	0
128			10,7	9,1	0
129			10,7	9	0
130			9,7	8,9	0
131			30,1	16,7	4
132			20,1	13,1	2
133			17,9	12	1
134			26,7	14,5	1
135	<i>Mugil cephalus</i>	Belanak	12,9	11,6	5
136			19,4	12,5	1
137			14,4	11,4	1
138			18,5	12,3	0
139			17,2	11,3	0
140			17,2	12,1	1

Ikan yang ditangkap dari Sungai Jeneberang

no	Spesies	Nama Lokal	Bobot (g)	Panjang (cm)	#MP
1		Tawes	190,8	22,8	0

2	<i>Barbonymus gonionotus</i>		102,9	20,5	3
3			312,9	27,9	1
4			191,7	23,4	4
5			182	23	0
6			157	21	0
7			72	17	2
8			134	20	0
9			117,6	20,4	7
10			46,7	12,3	1
11			99,9	17,5	2
12			149,2	17,5	4
13			136,5	21,7	2
14			215,5	25	9
15			<i>Oxyeleotris marmorata</i>	Betutu	208,8
16	252,9	26,3			2
17	137,3	22,3			1
18	162,8	22,8			1
19	109,4	20,3			3
20	70,5	18,1			2
21	121,6	21,7			4
22	136,7	22,5			0
23	120,8	21			1
24	137,6	21,8			0
25	116	19,1			1
26	50,6	15,9			0
27	106	19,4			5
28	95,4	20,3			1
29	74,2	18,2			1
30	90,8	19,1			0
31	170,4	27,9			0
32	124,2	21,4			1
33	80,1	18,9			0
34	85,1	19			0
35	119,2	21,1			0
36	134,4	21,6			0
37	60,2	17,4			1
38	169,9	23,1			1
39	101,1	19,3			1
40	83,2	18,4			0
41	237,2	25,9			1
42	166	23			0
43	95,3	19,5			1
44	114,7	20,1			0
45	258,4	27,3			0
46	147,3	23,1			0
47	242,7	26,1			0
48	79	19			4
49	145	22,9			4
50	310,2	27,5			1
51	120,9	21,3			0

52			146,5	22,6	1
53			112,8	20,6	0
54			106,6	21	1
55			134,8	22,7	2
56			108,6	20,5	2
57			107,2	21	1
58			102,4	20,5	1
59			74,4	19	2
60	<i>Glossogobius aureus</i>	Beloso	52,4	20,5	2
61			26,2	15,2	0
62			30,8	16,5	1
63			26,1	15,3	0
64			44,6	18,5	1
65			22,9	14,9	0
66			12,8	12,7	0

Lampiran 7. Score Value Kerusakan Histologi pada Organ Usus dan Hati

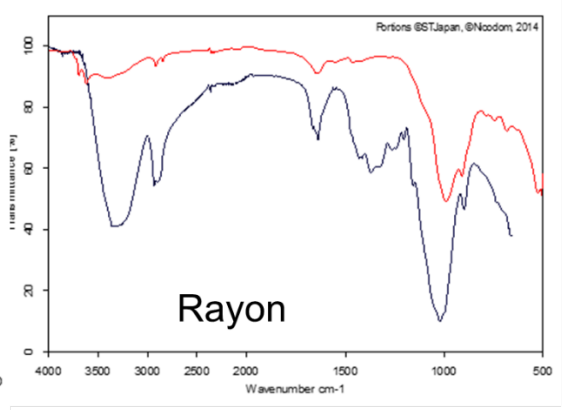
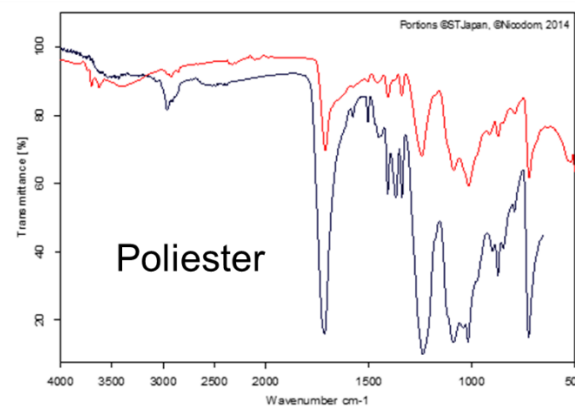
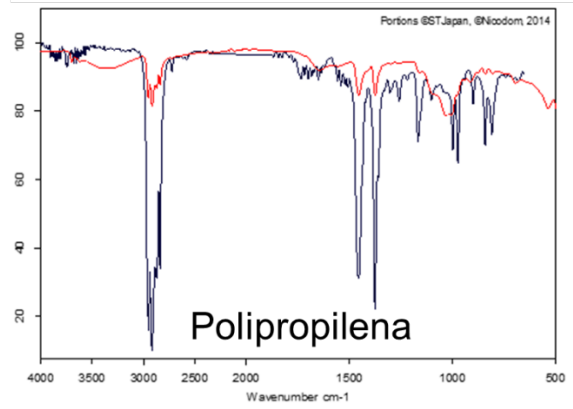
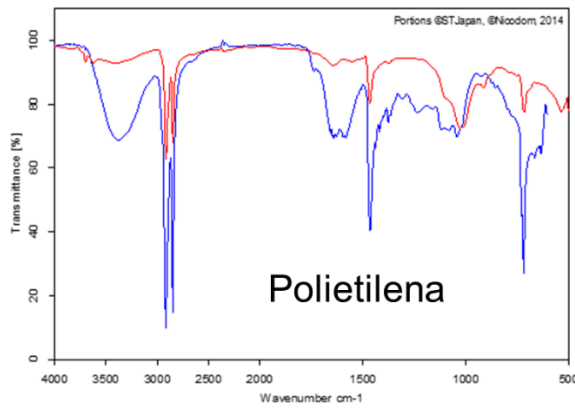
Organ usus, angka dalam kurung pada setiap kerusakan menunjukkan nilai *important factor*

Perlakuan	ulangan	Score value		
		Hemoragi (1)	Nekrosis (3)	Infiltrasi sel radang (2)
Kontrol	1	0	0	0
	2	0	0	0
	3	0	0	0
	4	0	0	0
	5	0	0	0
PMP	1	2	2	2
	2	2	2	2
	3	2	2	2
	4	2	2	2
	5	2	4	2
PMP+	1	2	4	2
	2	2	2	4
	3	2	2	2
	4	2	4	4
	5	2	4	4

Organ hati, angka dalam kurung pada setiap kerusakan menunjukkan nilai *important factor*

perlakuan	ulangan	Score value		
		Hemoragi (1)	Nekrosis (3)	MMC (2)
Kontrol	1	0	0	0
	2	0	0	0
	3	0	0	0
	4	0	0	0
	5	0	0	0
PMP	1	2	0	0
	2	4	0	0
	3	4	0	0
	4	4	0	0
	5	6	0	0
PMP+	1	4	2	2
	2	4	2	2
	3	4	4	2
	4	6	4	4
	5	6	4	4

Lampiran 8. Contoh Spektra Polimer yang Ditemukan pada Sampel



Lampiran 9. Dokumentasi Kegiatan



Sempadan Sungai Tallo



Sempadan Sungai Jeneberang



Bendungan Karet di Sungai jeneberang



Bendungan Sungguminasa di Sungai jeneberang



Pendarikan Neuston Net



Eceng gondok di lokasi sungai



Proses penyaringan sampel



Perlengkapan pengamatan MP



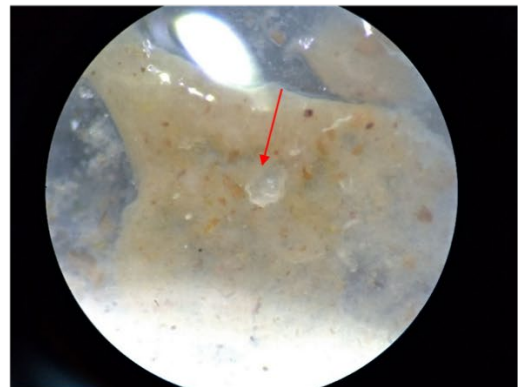
Packing ikan nila untuk kebutuhan eksperimen



Pengambilan darah ikan



Ikan nila yang digunakan untuk eksperimen



Keberadaan MP pada feses ikan

Lampiran 10. Riwayat Hidup Penulis



Data Diri

Nama

Ega Adhi Wicaksono

Tempat/Tanggal Lahir

Jakarta, 16 Agustus 1993

Jenis Kelamin

Laki-laki

Agama

Islam

Status

Belum menikah

Alamat

Bojonggede Indah G4 no 8 bogor,
16922

No. Handphone

+6285717833835

Email

egaadhi@gmail.com

Pendidikan Formal

2000-2005

SDN Pengadilan 3 Bogor

2005-2008

SMP Taruna Andigha Bogor

2008-2011

SMA IT Al-Madinah Bogor

2011-2016

S1 Program Studi Perikanan
Universitas Padjadjaran
(IPK: 3,74 ; Skala 4,00)

2017- 2021

S2 dan S3 jurusan ilmu perikanan
Universitas Hasanuddin (Skema
beasiswa PMDSU).

Beasiswa yang pernah diterima

1. Beasiswa Peningkatan Prestasi Akademik (PPA), Januari – Desember 2013
2. Beasiswa Program Master Menuju Doktor Untuk Sarjana Unggul (PMDSU), Agustus 2017 – Agustus 2021

Penelitian

Wicaksono, E. A., Sriati, Lili W., 2016. Distribusi logam berat timbal pada makrozoobenthos di Waduk Cirata, Provinsi Jawa Barat. *Jurnal Perikanan Kelautan* 7(1): 103-114.

Tahir A., Samawi M.F., Sari K., Hidayat R., Nimzet R., Wicaksono E.A., Asrul L., Werorilangi S., 2019. Studies on microplastic contamination in seagrass beds at Spermonde Archipelago of Makassar Strait, Indonesia. *Journal of Physics : Conference Series*. 1341 022008.

Wicaksono E.A., Tahir A., Werorilangi S., 2020. Preliminary study on microplastic pollution in surface-water at Tallo and Jeneberang Estuary, Makassar, Indonesia. *AAFL Bioflux* 13(2): 902-909.

Tahir A., Soeprapto, D.A., Sari, K., Wicaksono, E.A., Werorilangi, S., 2020. Microplastic assessment in Seagrass ecosystem at Kodingareng Lompo Island of Makassar City. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 564(1)012032

Wicaksono, E.A., Werorilangi, S., Tahir A., 2021. The influence of weirs on microplastic fate in the riverine environment (case study: Jeneberang River, Makassar City, Indonesia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 763(1)012054

Wicaksono, E. A., Werorilangi, S., Galloway, T.S., Tahir, A., 2021. Distribution and seasonal variation of microplastics in Tallo River, Makassar, eastern Indonesia. *Toxics* 9(6) 129.

Wicaksono, E.A., Werorilangi, S., Tahir, A., 2021. Microplastic occurrence in Venus clam *Marcia hiantina* (Veneridae) in Tallo Estuary, Makassar, Indonesia. *AAFL Bioflux* 14(3): 1651-1657.

Seminar Internasional

1. International Conference on Maritime Sciences and Advances Technology (MSAT) 2nd : in framework of the sustainable development goals. Makassar, 7-8 Agustus 2019.
2. Marine Resilience and Sustainable Development (MARSAVE) 2nd. Makassar (Daring), 10 Oktober 2020.