TUGAS AKHIR – RE 184804

KAJIAN LITERATUR PERBANDINGAN MEKANISME PENYISIHAN MIKROPLASTIK PADA PENGOLAHAN AIR MINUM MENGGUNAKAN TEKNOLOGI MEMBRAN DAN OZONASI TERINTEGRASI DENGAN FILTRASI

DEWI PUJI RAHAYU
03211740000027

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum M.App.Sc

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumian
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2021

TUGAS AKHIR – RE 184804

KAJIAN LITERATUR PERBANDINGAN MEKANISME PENYISIHAN MIKROPLASTIK PADA PENGOLAHAN AIR MINUM MENGGUNAKAN TEKNOLOGI MEMBRAN DAN OZONASI TERINTEGRASI DENGAN FILTRASI

DEWI PUJI RAHAYU
03211740000027

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum M.App.Sc

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumian
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2021

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

FINAL PROJECT – RE 184804

LITERATURE REVIEW ON COMPARISON OF MICROPLASTICS REMOVAL MECHANISMS IN WATER TREATMENT USING MEMBRANE TECHNOLOGY AND OZONATION INTEGRATED WITH FILTRATION

DEWI PUJI RAHAYU
03211740000027

Supervisor
Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum M.App.Sc

DEPARTMEN OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
Faculty of Civil, Planning and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2021

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

HALAMAN PENGESAHAN

LEMBAR PENGESAHAN

KAJIAN LITERATUR PERBANDINGAN MEKANISME PENYISIHAN MIKROPLASTIK PADA PENGOLAHAN AIR MINUM MENGGUNAKAN TEKNOLOGI MEMBRAN DAN OZONASI TERINTEGRASI DENGAN FILTRASI

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumian
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya

Oleh :
DEWI PUJI RAHAYU
NRP. 03211740000027

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir

Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc
NIP. 19530706 198403 2 004

SURABAYA
AGUSTUS 2021

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ABSTRAK

KAJIAN LITERATUR PERBANDINGAN MEKANISME PENYISIHAN MIKROPLASTIK PADA PENGOLAHAN AIR MINUM MENGGUNAKAN TEKNOLOGI MEMBRAN DAN OZONASI TERINTEGRASI DENGAN FILTRASI

Nama	: Dewi Puji Rahayu
NRP	: 03211740000027
Departemen	: Teknik Lingkungan
Dosen Pembimbing	: Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc

ABSTRAK

Mikroplastik telah mencemari berbagai wilayah perairan seperti air sungai, air limbah dan pada akhirnya bermuara di lautan. Mikroplastik berbahaya bagi kehidupan biota perairan maupun manusia. Mikroplastik dapat masuk ke tubuh manusia melalui konsumsi biota air yang tercemar mikroplastik dan air minum. Berbagai teknologi diterapkan untuk menyisihkan mikroplastik dalam air, diantaranya teknologi membran dan teknologi ozonasi terintegrasi dengan filtrasi. Namun kajian literatur mengenai metode yang paling tepat untuk menghilangkan mikroplastik pada air minum di antara kedua teknologi tersebut belum tersedia. Kajian literatur ini bertujuan untuk: (1) menentukan karakteristik dan jenis mikroplastik yang terdapat pada air minum, (2) membandingkan mekanisme penyisihan mikroplastik pada pengolahan air minum menggunakan teknologi membran dan ozonasi terintegrasi dengan filtrasi, serta (3) membandingkan keunggulan dan kelemahan penyisihan mikroplastik pada kedua teknologi tersebut.

Kajian pustaka bersumber dari buku teks, jurnal ilmiah nasional dan internasional, serta referensi ilmiah lain yang berhubungan dengan ide studi. Pembatasan dilakukan dengan mengutamakan pengolahan di negara berkembang. Data yang diperlukan untuk analisis dan pembahasan meliputi karakteristik, efisiensi penyisihan dan kelimpahan mikroplastik. Pembahasan meliputi proses dan mekanisme penyisihan mikroplastik serta perbandingan kelebihan dan kekurangan antara kedua teknologi.

Hasil kajian literatur menunjukkan bahwa, kelimpahan mikroplastik pada air baku sebesar 17-7000 partikel/L dan pada air produksi mencapai 2–1401 partikel/L. Jenis polimer penyusun mikroplastik di air minum didominasi oleh PET, PE, PP, *polyester*, selulosa asetat, dan LDPE. Adapun, bentuk paling dominan adalah serat (*fiber)* dan fragmen. *Range* ukuran mikroplastik di air minum sangat bervariasi, yaitu 1 µm – 5 mm. Penelitian mengenai warna mikroplastik sangat jarang dilakukan. Pada teknologi membran ultrafiltrasi dan mikrofiltrasi mekanisme proses penyisihan mikroplastik terjadi melalui proses penyaringan akibat perbedaan ukuran antara partikel mikroplastik dengan ukuran pori membran. Sementara, pada teknologi ozonasi tidak terjadi penyisihan mikroplastik melainkan partikel berubah menjadi bentuk yang lebih kecil yang dipisahkan dengan mekanisme penyaringan dan adsorpsi pada tahap filtrasi. Teknologi membran lebih unggul dalam menyisihkan mikroplastik dibandingkan dengan teknologi ozonasi terintegrasi dengan filtrasi terutama pada aspek: efisiensi penyisihan sebesar 91-100%, selektivitas, biaya, kemudahan operasional dan *maintenance* serta, efisiensi ruang.

Kata kunci: Mikroplastik, Mikrofiltrasi, Ozonasi, Pengolahan Air, Ultrafiltrasi

ABSTRACT

LITERATURE REVIEW ON COMPARISON OF MICROPLASTICS REMOVAL MECHANISMS IN WATER TREATMENT USING MEMBRANE TECHNOLOGY AND OZONATION INTEGRATED WITH FILTRATION

Name of Student	: Dewi Puji Rahayu
NRP	: 03211740000027
Department	: Environmental Engineering
Supervisor	: Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc

ABSTRACT

Microplastics have polluted various aquatic areas such as river, sewage and ultimately flowed into the oceans. Microplastics are harmful to marine and human life. Microplastics can enter the human body through the consumption of contaminated aquatic biota and drinking water. Various technologies were applied to remove microplastics in the water, including membrane technology and ozonation technology integrated with filtration. However, a literature review on the most appropriate method for removing microplastics in drinking water between both technologies is still unknown. The aims of this study were: (1) to determine the characteristic and polymer types of microplastics in drinking water, (2) to compare the mechanism of microplastics removal in water treatment using membrane technology and integrated ozonation with filtration, and (3) to compare the advantages and disadvantages of microplastic removal using both technologies.

Literature studies sources were textbooks, national and international scientific journals, and other scientific references related to study ideas. The process from developing countries was the priority. Required data for the analysis and discussion included characteristics of microplastics, microplastics removal efficiency, and the abundance of microplastics. This study covered discussion concerning microplastics removal process mechanism and compared the advantages and disadvantages of both technologies.

The results of the studies showed that the abundance of microplastics in raw water were 17-7000 particles/L and reached 2-1401 particles/L in drinking water. The types of microplastics

polymers in drinking water were dominated by PET, PE, PP, polyester, cellulose acetate, and LDPE. Meanwhile, the most dominant forms were *fiber*s and fragments. The distribution of microplastics size ranges in drinking water varied considerably (1 µm - 5 mm). Research on the color of microplastics was scarce. In ultrafiltration and microfiltration, removal of microplastics occurred through a filtering process due to the size difference between the particles and the membrane pore size. Meanwhile, ozonation technology could not remove microplastics, but the particle broke down into smaller forms and separated by filtering and adsorption mechanisms at the filtration stage. Membrane technology had better performance than integrated ozonation technology in terms of efficiency removal reached 91-100%, filter selectivity, ease of operation and maintenance as well as space efficiency.

Keywords: Microplastics, Microfiltration, Ozonation, Water Treatment, Ultrafiltration

KATA PENGANTAR

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan Allah SWT. Karena berkat limpahan rahmat, berkah dan karunia-Nya, penulis mampu menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul " Kajian Literatur Perbandingan Mekanisme Penyisihan Mikroplastik menggunakan Teknologi Membran dan Teknologi Ozonasi Terintegrasi dengan Filtrasi" ini tepat pada waktunya.

Terselesaikannya tugas ini tentunya tak lepas dari dorongan dan uluran tangan berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada :

1. Ibu Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App. Sc. selaku dosen pembimbing tugas akhir, terima kasih atas kesediaan, nasehat, kesabaran, bimbingan dan ilmu yang telah diberikan.
2. Bapak Arseto Yekti Bagastyo, ST., MT., M.Phil., PhD., dan Ibu Dr. Ir. Ellina Sitepu Pandebesie, MT., selaku dosen pengarah seminar proposal tugas akhir atas segala saran dan bimbingannya.
3. Bapak Arseto Yekti Bagastyo, ST., MT., M.Phil., PhD., dan Ibu IDAA Warmadewanthi ST., MT., PhD. selaku dosen pengarah seminar kemajuan tugas akhir atas segala saran dan bimbingannya
4. Ibu IDAA Warmadewanthi ST., MT., PhD., dan Bapak Ir. Bowo Djoko Marsono, M.Eng selaku dosen penguji pada ujian lisan tugas akhir atas segala saran dan arahannya.
5. Bapak Dr. Abdu Fadli Assomadi S.Si., MT., selaku dosen wali atas segala nasehat, dukungan dan semangat untuk terus belajar.
6. Seluruh dosen Program Sarjana Teknik Lingkungan ITS, atas ilmu yang diberikan selama masa perkuliahan.
7. Orang tua dan keluarga penulis atas segala dukungan serta doa yang telah diberikan
8. Teman bimbingan tugas akhir Ajeng, Lily dan Novi yang bersama-sama selalu saling memberikan semangat untuk menyelesaikan tugas akhir ini
9. Veny, Yosi, Abi, Chesia, Marwah, Laily dan Christine serta teman-teman angkatan 2017 Departemen Teknik Lingkungan

yang senantiasa memberikan bantuan selama penyusunan tugas akhir.

10. Serta semua pihak, sahabat, teman dan kerabat yang tidak dapat disebutkan satu persatu namun telah memberikan bantuan yang hingga selesainya tugas akhir ini.

Semoga laporan ini dapat memberikan manfaat bagi penulis maupun yang membacanya.

Surabaya, 29 Juli 2021

Penulis

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN i
ABSTRAK i
ABSTRACT iii
KATA PENGANTAR v
DAFTAR ISI vii
DAFTAR TABEL ix
DAFTAR GAMBAR xi
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1. Latar Belakang 1
1.2. Rumusan Masalah 3
1.3. Tujuan Studi 3
1.4. Ruang Lingkup 4
1.5. Manfaat 4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1. Karakteristik Mikroplastik 5
2.1.1. Bentuk dan Warna Mikroplastik 5
2.1.2. Jenis Polimer Penyusun Plastik 7
2.2. Metode Identifikasi Mikroplastik 8
2.3. Sumber Mikroplastik 8
2.4. Dampak Mikroplastik 9
2.5. Teknologi Membran 10
2.5.1. Mikrofiltrasi 11
2.5.2. Ultrafiltrasi 11
2.6. Teknologi Ozonasi dan FIltrasi 12
BAB III METODE STUDI 15
3.1. Kerangka Studi 15
3.2. Ide Studi 17
3.3. Alur Pikir Studi 17

3.4. Metode Studi 18
3.5. Pengumpulan Data dan Kajian Pustaka 19
3.6. Hasil dan Pembahasan 20
3.7. Kesimpulan dan Saran 22
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 23
4.1. Karakteristik dan Kelimpahan Mikroplastik pada Air Minum 23
4.1.1. Karakteristik Fisik Mikroplastik 27
4.1.2. Identifikasi Polimer dan Kemungkinan Sumber Kontaminasi 32
4.2. Mekanisme Penyisihan Mikroplastik pada Pengolahan Air Minum Teknologi Membran dan Ozonasi Terintegrasi dengan Filtrasi 34
4.2.1. Mekanisme Kerja pada Masing-masing teknologi 35
4.2.2. Kemampuan dan Aplikasi Teknologi dalam Penyisihan Mikroplastik 37
4.3. Perbandingan Keunggulan dan Kelemahan Teknologi Membran dan Ozonasi Terintegrasi dengan Filtrasi dalam Menyisihkan Mikroplastik 55
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 65
5.1. Kesimpulan 65
5.2. Saran 66
DAFTAR PUSTAKA 67
BIOGRAFI PENULIS 79

DAFTAR TABEL

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Kategori Warna Mikroplastik 5
Tabel 2. 2 Pengelompokan bentuk Mikroplastik.....7
Tabel 2. 3 Densitas Polimer 8

Tabel 4. 1 Perbandingan Kelimpahan Mikroplastik Pada Air Baku dan Air Olahan IPAM.....25
Tabel 4. 2 Karakteristik Mikroplastik Pada Air Minum 29
Tabel 4. 3 Aplikasi Teknologi Membran dalam Menghilangkan Mikroplastik.....39
Tabel 4. 4 Perbandingan Membran dengan Sistem Operasi Dead-End Dan Cross-Flow 44
Tabel 4. 5 Efisiensi Penyisihan Mikroplastik dengan Teknologi Ozonasi Terintegrasi dengan Filtrasi.....47
Tabel 4. 6 Persamaan Regresi Kurva Biaya pada Teknologi Ozon dan Membran 59
Tabel 4. 7 Perbandingan Biaya Investasi.....59
Tabel 4. 8 Perbandingan Biaya Operasional & Maintenance 60
Tabel 4. 9 Perbandingan Teknologi Membran Mikrofiltrasi/Ultrafiltrasi dan Teknologi Ozonasi Terintegrasi dengan Filtrasi.....61

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Bentuk Mikroskopik Mikroplastik 6
Gambar 2. 2 Mekanisme Penyebaran Mikroplastik 9
Gambar 2. 3 Membran Mikrofiltrasi 11
Gambar 2. 4 Ultrafiltrasi Tubular 12

Gambar 3. 1 Kerangka Studi 17
Gambar 3. 2 Alur Pikir Studi Literatur.....18
Gambar 3. 3 Diagram Alir Proses Pengolahan Air Minum dengan Teknologi Membran. 20
Gambar 3. 4 Diagram Alir Proses Pengolahan Air Minum dengan Teknologi Ozonasi Terintegrasi dengan Filtrasi. 20

Gambar 4. 1 Proses Pemisahan pada Membran Filter. 35
Gambar 4. 2 Pemisahan Membran Mikrofiltrasi dan Ultrafiltrasi36
Gambar 4. 3 Mode operasi aliran searah pada membran 42
Gambar 4. 4 Mode operasi aliran silang pada membran 43
Gambar 4. 5 Interaksi antara Mikroplastik dan Pasir Silika pada Rapid Sand Filter. 53

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 1
PENDAHULUAN

BAB I
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Produksi plastik global pada tahun 2018 telah mencapai 359 ton, dan semakin meningkat seiring dengan tingginya penggunaan plastik (*Plastic Europe*, 2019). Peningkatan penggunaan plastik yang tidak diiringi dengan pengelolaan yang baik akan berakibat pencemaran plastik (Lestari *and* Trihadiningrum, 2019). Indonesia merupakan penyumbang pencemaran plastik di lautan, terbesar kedua di dunia (Jambeck *et al*., 2015). Pencemaran plastik dapat menyebabkan penyumbatan pada sistem drainase, mengurangi estetika (Ryan *et al*., 2009) hingga terakumulasi pada tubuh biota perairan (Hosoda *et al*., 2014; Mizukawa *et al*., 2013; McNeish *et al*., 2018).

Plastik memiliki densitas yang lebih rendah daripada air, sehingga plastik mudah berpindah dan terdistribusi oleh limpasan air hujan lalu bermuara di laut (Ryan *et al*., 2009). Distribusi plastik dalam perairan menyebabkan fragmentasi akibat berbagai proses fisik, kimia maupun biologi sehingga plastik berubah bentuk menjadi mikroplastik (Cole *et al*., 2011; Ryan *et al*., 2009*).* Pada umumnya plastik sulit terdegradasi secara alami, sehingga menyebabkan akumulasi plastik di sungai, laut dan sedimen (Firdaus *et al*., 2020). Mikroplastik telah ditemukan pada air limbah (Bui *et al*., 2020), air minum hasil pengolahan (Novotna *et al*., 2019) dan air minum dalam kemasan (Obman *et al*., 2018).

Mikroplastik merupakan partikel plastik dengan ukuran kurang dari 5 mm (Lestari *et al*., 2020; Li *et al*., 2018; Wang *et al*., 2020). Mikroplastik berasal dari berbagai sumber seperti aktivitas industri, kegiatan mencuci baju hingga degradasi sampah di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) (Browne *et al*., 2011; Cole *et al.,* 2011). Sumber air baku PDAM Kota Surabaya telah tercemar mikroplastik sebanyak 1,47 – 43,11 partikel/m^3 (Lestari *et al*., 2020). Pada tahun 2020 telah ditemukan mikroplastik pada air baku IPAM Karangpilang PDAM Kota Surabaya sebesar 54,4 partikel/L dan 13 partikel/L pada air produksi (Mar'atusholihah *et al.*, 2021). Pencemaran mikroplastik juga terjadi di air baku di Cina, yaitu sebesar 6614 ± 1132 partikel/L (Wang *et al*., 2020) dan IPAM

wilayah urban Republik Ceko sebesar 1383–1575 partikel/L pada air baku dan 369–485 partikel/L pada air produksi (Pivonkonsky *et al*., 2018).

Keberadaan mikroplastik di badan air dapat menyebabkan gangguan kesehatan pada tubuh manusia akibat masuknya mikroplastik dari konsumsi air minum maupun konsumsi biota perairan (McNeish *et al*., 2018; Prata *et al*., 2020). Ketidakmampuan sistem kekebalan tubuh untuk menghilangkan partikel sintetis dapat menyebabkan peradangan kronis. Mikroplastik dalam tubuh pada konsentrasi tertentu menyebabkan gangguan kesehatan seperti penyakit neurodegeneratif, gangguan imun dan kanker (Prata *et al*., 2020).

Pengolahan air minum secara konvensional terdiri atas koagulasi, flokulasi, sedimentasi dan filtrasi, yang secara keseluruhan memiliki efisiensi penyisihan mikroplastik sebesar 70-80% (Novotna *et al*., 2019). Untuk meningkatkan efisiensi penyisihan mikroplastik pada air minum dapat dilakukan pengolahan lanjutan setelah penerapan teknologi konvensional. Teknologi lanjut yang dapat digunakan antara lain yaitu, teknologi membran dan teknologi ozonasi terintegrasi dengan filtrasi.

Menurut Shen *et al*. (2020), teknologi membran yang sering digunakan dalam proses pengolahan air adalah mikrofiltrasi, ultrafiltrasi, nanofiltrasi dan *reverse* osmosis. Dari berbagai teknologi membran yang ada, mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi memiliki ukuran pori yang paling sesuai untuk menyisihkan mikroplastik berukuran 0,1-5.000 μm. Mikrofiltrasi adalah membran bertekanan dengan ukuran pori 0,1-10 μm dan mampu memisahkan partikel dan koloid berukuran antara 100-20 mm (Baker, 2004; Belfort *et al*., 1994). Ultrafiltrasi merupakan membran mikropori yang bekerja pada tekanan 1-10 bar dan memiliki ukuran pori antara 0,001-0,1 μm (Poerio *et al*., 2019).

Teknologi membran memiliki selektivitas yang tinggi sehingga mampu menyisihkan polutan, sekaligus mendesinfeksi air serta menurunkan kesadahan air (Shen *et al.*, 2020). Pada teknologi ozonasi, terjadi fragmentasi mikroplastik akibat degradasi zat organik sehingga diperlukan proses penyaringan pada tahap selanjutnya untuk memisahkan

mikroplastik (Wang *et al*., 2020). Pengolahan air minum konvensional yang dikombinasikan dengan teknologi ozonasi dan filter karbon aktif memiliki efisiensi penyisihan mikroplastik secara keseluruhan sebesar 82,1–88,6 % (Wang *et al*., 2020). Sementara membran mikrofiltrasi dapat menyisihkan mikroplastik hingga 95% pada garam (Yaranal *et al.,* 2021) dan membran ultrafiltrasi mampu menyisihkan mikroplastik sebesar 75 % pada lindi (Zhang *et al.,* 2021). Efisiensi penyisihan mikroplastik dipengaruhi oleh bentuk dan ukuran mikroplastik (Wang *et al.,* 2020) serta kriteria desain pada setiap unit pengolahan (Novotna *et al.,* 2019).

Penerapan teknologi membran maupun ozonasi setelah teknologi konvensional untuk menghilangkan mikroplastik pada umumnya belum banyak dilakukan. Sumber air baku, proses pengolahan serta penelitian terdahulu perlu dikaji sebagai pertimbangan untuk membandingkan mekanisme penyisihan mikroplastik dengan teknologi membran dan teknologi ozonasi. Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka perlu dilakukan studi literatur mengenai penyisihan mikroplastik pada pengolahan air minum dengan teknologi membran dan teknologi ozonasi terintegrasi dengan filtrasi.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang mendasari studi literatur ini adalah:

1. Bagaimana karakteristik dan jenis mikroplastik yang terdapat pada air minum?
2. Bagaimana mekanisme penyisihan mikroplastik pada pengolahan air minum menggunakan teknologi membran dan ozonasi terintegrasi dengan filtrasi?
3. Bagaimana keunggulan dan kelemahan penyisihan mikroplastik pada pengolahan air minum menggunakan teknologi membran dan ozonasi terintegrasi dengan filtrasi?

1.3. Tujuan Studi

Adapun tujuan dari studi literatur ini adalah :

1 Menentukan karakteristik dan jenis mikroplastik yang terdapat pada air minum

2 Membandingkan mekanisme penyisihan mikroplastik pada pengolahan air minum menggunakan teknologi membran dan ozonasi terintegrasi dengan filtrasi
3 Membandingkan keunggulan dan kelemahan penyisihan mikroplastik pada pengolahan air minum menggunakan teknologi membran dan ozonasi terintegrasi dengan filtrasi

1.4. Ruang Lingkup

Adapun ruang lingkup dalam studi literatur ini yaitu:

1. Parameter pembanding teknologi satu dengan yang lainnya ialah:
   - Efisiensi *removal*
   - Mekanisme proses penyisihan mikroplastik pada setiap teknologi pengolahan.
   - Kelimpahan (partikel/L) dan karakteristik mikroplastik (bentuk, warna, jenis polimer) pada setiap teknologi pengolahan.
2. Sumber air baku yang dibahas adalah air sungai dan apabila tidak mencukupi maka diperluas hingga air limbah.
3. Air minum yang dimaksud yaitu air produksi IPAM
4. Studi kasus akan menggunakan data yang tersedia dari IPAM yang telah mengaplikasikan teknologi membran dan teknologi ozonasi terintegrasi dengan filtrasi.

1.5. Manfaat

Adapun manfaat yang diharapkan dari studi literatur ini yaitu :

1. Memberikan informasi mengenai karakteristik dan jenis mikroplastik pada air minum
2. Memberikan informasi mengenai mekanisme penyisihan mikroplastik pada pengolahan air minum dengan teknologi membran dan ozonasi terintegrasi dengan filtrasi
3. Memberikan informasi mengenai keunggulan dan kelemahan penyisihan mikroplastik pada pengolahan air minum dengan teknologi membran dan ozonasi terintegrasi dengan filtrasi

BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Karakteristik Mikroplastik

2.1.1. Bentuk dan Warna Mikroplastik

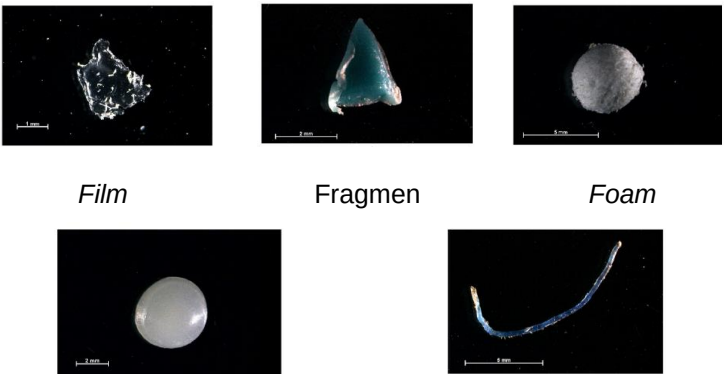
Kelimpahan mikroplastik di alam dapat diidentifikasi dengan berbagai bentuk, warna dan ukuran (Peng *et al.*, 2018). Menurut Peng *et al*. (2017), mikroplastik dapat dibedakan menjadi dua yaitu *small microplastics* dan *large microplastics*. Mikroplastik dengan ukuran 1 hingga 5 mm disebut *large microplastic* sedangkan mikroplastik dengan ukuran lebih besar dari 1 µm dan lebih kecil dari 1 mm disebut *small microplastics*. Mikroplastik ditemukan di perairan dalam berbagai warna seperti transparan, merah, putih, biru hitam (Peng *et al.*, 2018) dan kuning (Lestari *et al.*, 2020). Menurut Peng *et al.* (2017, penggolongan warna mikroplastik dapat dilakukan berdasarkan kategori warna dasar seperti Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Kategori Warna Mikroplastik

No	Kategori Warna	Warna Partikel Mikroplastik
1	Biru	Biru muda, biru tua, hijau tua, hijau muda
2	Hitam	Hitam transparan, abu-abu, putih belang hitam,
3	Kuning	Oranye dan coklat
4	Transparan	Tanpa warna (bening)
5	Putih	*Silver* dan putih
6	Merah	Merah, merah muda dan ungu

Sumber: Peng *et al.* (2017)

Bentuk mikroplastik dapat berupa fragmen, *fiber* (serat), bulat (Wang *et al*., 2020). Bentuk mikroplastik yang paling banyak ditemukan dalam unit pengolahan air minum adalah *fiber* dan fragmen sementara, bentuk bulat merupakan yang paling jarang ditemukan (Novotna *et al.,* 2019). Menurut Lestari *et al*. (2020), penampakan bentuk mikroplastik dapat dilihat dengan *stereo microscope* dan dikelompokkan menjadi lima yaitu *film*, fragmen, *foam, pellet* dan *fiber*. Adapun berbagai bentuk mikroskopik dari mikroplastik dapat dilihat pada Gambar 2.1



Gambar 2. 1 Bentuk Mikroskopik Mikroplastik
Sumber: Lestari *et al*. (2020).

Menurut Pivokonský *et al.* (2018), jenis polimer penyusun mikroplastik yang banyak ditemukan di air minum adalah PET *(polyethylene terephthalate)*, PP *(polypropylene*) and PE *(polyethylene*) sedangkan bentuk mikroplastik dapat dikelompokkan seperti pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Pengelompokan bentuk Mikroplastik

No	Bentuk	Keterangan
1.	Serat *(Fiber)*	Partikel dengan penampilan panjang dan tipis (ukuran diukur dengan diameter serat),
2	Bulat	Partikel berbentuk lingkaran (ukuran = diameter)
3.	fragmen	Partikel yang tersisa berbentuk potongan/serpihan (ukuran sebagai jarak antara dua titik paling jauh dari sebuah partikel).

Sumber: Pivokonský *et al*. (2018)

2.1.2.Jenis Polimer Penyusun Plastik

Menurut Crawford *and* Quinn (2017), kekuatan, elastisitas, dan sifat fisik dari plastik dipengaruhi oleh atom-atom penyusunnya. Jenis ikatan antar atom mempengaruhi ketahanan material terhadap panas dan sinar ultraviolet sehingga mempengaruhi degradasi plastik di lingkungan. Densitas plastik akan mempengaruhi distribusi plastik di dalam air. Apabila densitas polimer penyusun lebih kecil dibandingkan densitas air maka, plastik cenderung akan terapung, begitupun sebaliknya. Pada pengolahan air minum dengan teknologi lanjut di Cina, mikroplastik dengan jenis polimer PET merupakan yang paling banyak ditemukan (Wang *et al*., 2020). Jenis polimer plastik dipengaruhi oleh produksi plastik, pola konsumsi dan pengelolaan plastik pada suatu lingkungan. Tabel densitas beberapa jenis polimer penyusun plastik dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Densitas Polimer

Polimer Penyusun	Singkatan	Densitas (gr/cm3)
Polystyrene (foam elastis*)*	EPS	0.01–0.05
Polystyrene (foam non elastis*)*	XPS	0.03-0.005
Low-density polyethylene	LDPE	0.92–0.94
Linear low-density polyethylene	LLDPE	0.92–0.95
High-density polyethylene	HDPE	0.94–0.97
Polypropylene	PP	0.88–1.23
Polyethylene terephthalate	PET	1.30–1.50
Polystyrene (solid)	PS	1.04–1.50
Polyvinyl chloride	PVC	1.15–1.70
Polytetrafluoroethylene	PTFE	2.10–2.30

Sumber: Crawford *and* Quinn (2017)

2.2. Metode Identifikasi Mikroplastik

Identifikasi mikroplastik terbagi menjadi dua yaitu secara fisika (bentuk, warna, ukuran) mikroplastik dan secara kimia (jenis polimer penyusun plastik) (Shim *et al.,* 2016). Menurut Li *et al.* (2018), terdapat beberapa metode yang digunakan untuk analisis mikroplastik baik secara kualitatif dan kuantitatif diantaranya:

1. Metode sortasi visual: sampel dihitung secara langsung dengan bantuan mikroskop.
2. Metode *spectroscopy*: *Raman spectroscopy*, *scanning electron spectroscopy*, *fourier transform infrared* (FTIR)
3. Metode kromatografi*: pyrolysis gas chromatography* dan *liquid chromatography*

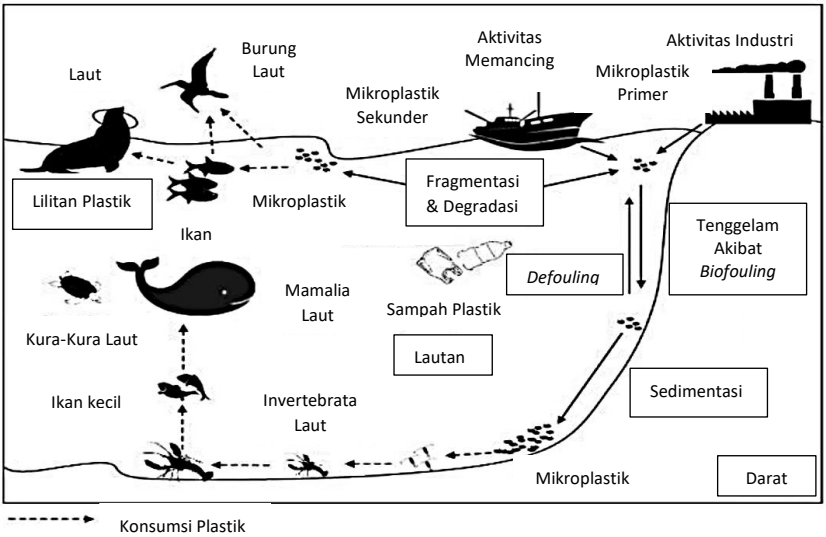
2.3. Sumber Mikroplastik

Mikroplastik pada wilayah perairan berasal dari mikroplastik primer dan sekunder. Mikroplastik primer merupakan mikroplastik yang diproduksi dalam ukuran mikroskopis, sedangkan mikroplastik sekunder adalah hasil fragmentasi plastik berukuran besar (Talvitie *et al.*, 2017). Sumber mikroplastik primer didominasi aktivitas industri terutama industri kosmetik, bahan pembersih, bahan peledak dan industri kemasan (Thompson *et al*., 2015;

Yahyanezad *et al.,* 2021). Lindi dari proses pengolahan sampah yang tidak dikelola dengan baik juga menjadi sumber mikroplastik. Lindi dapat terdistribusi ke saluran drainase, sungai atau badan air lainnya (Cole *et al*., 2011). Penelitian yang dilakukan Browne *et al.* (2011), menemukan bahwa pencucian baju juga menyebabkan kontaminasi mikroplastik pada air limbah rumah tangga yang didominasi oleh *fiber* dan polimer *polyester.*

2.4. Dampak Mikroplastik

Menurut Wibowo *et al.* (2019), mikroplastik primer dan sekunder masuk ke wilayah perairan dan akan mengalami degradasi oleh sinar matahari (UV), oksidasi dan radiasi yang menyebabkan plastik mengalami pembentukan *biofilm* serta perubahan morfologi baik berupa ukuran, bentuk, warna dan densitas. Perubahan morfologi plastik menjadi mikroplastik membuat mikroplastik dengan mudah masuk ke biota laut sehingga menyebabkan mikroplastik mengalami bioakumulasi (pertambahan) dan biomagnifikasi (penggandaan). Mekanisme penyebaran mikroplastik dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Mekanisme Penyebaran Mikroplastik
Sumber: Wibowo et al. (2019).

Paparan mikroplastik juga terjadi pada manusia akibat mengkonsumsi biota laut dan sungai seperti ikan, kerang, dan udang (Neish *et al., 2018*; Prata *et al.,* 2020). Mikroplastik yang terakumulasi dalam tubuh manusia pada konsentrasi tertentu dapat menyebabkan gangguan kesehatan seperti penyakit neurodegeneratif, gangguan imun dan kanker (Prata *et al*., 2020).

2.5. Teknologi Membran

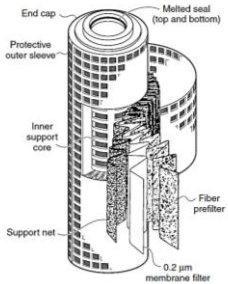
Membran adalah lapisan tipis semipermeabel yang dapat memisahkan zat apabila terdapat gaya dorong yang diberikan komponen dalam umpan (Wenten, 2016). Teknologi membran banyak diterapkan pada pengolahan air pada air minum, setelah penerapan teknologi konvensional. Pengolahan air minum secara konvensional terdiri atas koagulasi, flokulasi, sedimentasi, serta filtrasi (Novotna *et al.,* 2019). Menurut Baker (2004), teknologi membran dapat dikelompokkan menjadi dua berdasarkan cara transportasi membran yaitu:

1. Model difusi-kelarutan
   Pada model ini pemisahan terjadi akibat perbedaan kelarutan pada membran serta kecepatan material berdifusi melewati membran.
2. Model aliran pori.
   Pemisahannya didasarkan penyaringan pada permukaan (pori-pori) membran, sehingga sebagian partikel tertahan pada permukaan membran dan sebagian lainnya lolos dari permukaan membran.

Membran mikrofiltrasi dan membran ultrafiltrasi termasuk membran dengan sistem transportasi aliran pori, dimana bentuk dan ukuran partikel akan mempengaruhi kemampuan penyaringan membran (Cheryan, 1998; Baker, 2004). *Fouling* merupakan masalah yang sering terjadi pada teknologi membran akibat penyaringan secara terus-menerus (Masduqi dan Assomadi, 2012).

2.5.1.Mikrofiltrasi

Mikrofiltrasi memiliki ukuran pori antara 0,1 hingga 10 μm yang mampu memisahkan partikel dan koloid tersuspensi (Baker, 2004). Membran mikrofiltrasi bekerja pada tekanan rendah yaitu < 50 psi serta kecepatan tinggi yaitu sekitar 10^{-4} hingga 10^{-2} m/detik (Belfort *et al*., 1994). Menurut Salahudin dan Wibisono (2019), berdasarkan material penyusunnya membran mikrofiltrasi dibedakan menjadi dua jenis yaitu material organik atau anorganik. Membran dengan material anorganik berupa membran keramik, yang pada umumnya terbuat dari material alumina, zirkonia, itrium, dan titanium. Sedangkan, membran dengan penyusun organik biasanya terdiri atas berbagai jenis polimer seperti polisulfon (PS), polipropilen (PP), poli-viniliden florida (PVDF), polikarbonat (PC), polivinil klorida (PVC), dan poli-akrilo nitril (PAN). Adapun gambar bagian-bagian membran mikrofiltrasi dapat dilihat pada Gambar 2.3 (a) dan contoh membran mikrofiltrasi tipe *hollow fiber* dapat dilihat pada Gambar 2.3 (b).



(a) Bagian-Bagian Membran Mikrofiltrasi

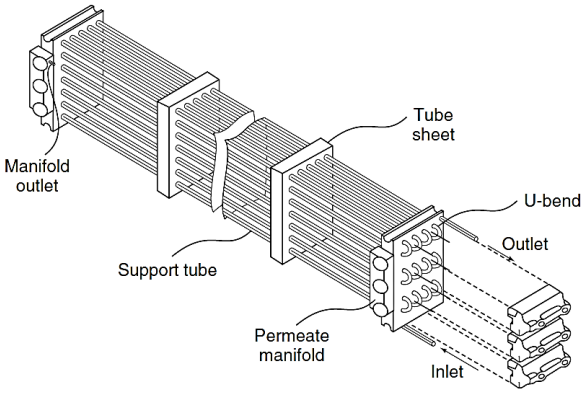
(b) *Hollow Fiber Microfiltration*

Gambar 2. 3 Membran Mikrofiltrasi
Sumber: Baker (2004)

2.5.2.Ultrafiltrasi

Ultrafiltrasi merupakan proses pemisahan dengan membran yang memiliki memiliki ukuran pori antara 0,001-0,1 μm dan beroperasi pada tekanan 30-90 psi (Masduqi dan Assomadi, 2012; Poerio *et al.,* 2019). Membran ultrafiltrasi pada umumnya tersusun

oleh dua lapis, yaitu lapisan tipis 1-5 μm dan lapisan tebal berpori halus 25-50 μm. Ultrafiltrasi dapat meningkatkan efisiensi untuk menghilangkan berbagai partikel, bakteri, alga, virus (Guo *et al.* ,2007) serta mikroplastik (Ma *et al.,* 2019). Membran ultrafiltrasi dengan bahan polivinil klorida (PVC) memiliki biaya yang lebih rendah dan ketahanan yang lebih kuat dan sangat banyak diterapkan untuk produksi air minum skala besar (Yu *et al.,* 2020). Adapun gambar salah satu model ultrafiltrasi dapat dilihat pada Gambar 2.5



Gambar 2. 4 Ultrafiltrasi Tubular
Sumber: Baker (2004)

2.6. Teknologi Ozonasi dan FIltrasi

Menurut Said (2007), pada proses pengolahan air minum ozon banyak digunakan sebagai oksidator untuk menghilangkan senyawa penyebab rasa dan bau, warna, zat organik, deterjen, fenol serta zat organik lain pada tahap desinfeksi. Ozon atau O^3 merupakan oksidator kuat yang mampu memecah senyawa komplek menjadi lebih sederhana. Menurut Masduqi dan Assomadi (2012), ozon berupa gas berbau tajam yang berwarna biru. Faktor penting yang berpengaruh dalam proses ozonasi adalah waktu kontak (dosis ozon dikalikan dengan waktu).

Menurut Masduqi dan Assomadi (2012), filtrasi merupakan teknologi konvensional dimana proses pemisahan zat padat dari fluida dengan suatu media, Media filtrasi dapat berupa karbon aktif, pasir, kerikil atau media berpori lainnya. Keuntungan utama menggunakan karbon aktif adalah efektif menghilangkan mikroplastik dengan ukuran yang bervariasi dan serta tidak ada produk sampingan dihasilkan (Baresel *et al.,* 2019). Menurut Wang *et al.* (2020), filtrasi dengan karbon aktif dapat menyisihkan mikroplastik hingga 73,7-98% dimana bentuk plastik yang dominan berupa *fiber*, pellet dan fragmen dengan jenis polimer yang paling banyak ditemui adalah PE dan PP. Kombinasi filtrasi dengan karbon aktif dan ozonasi mampu meningkatkan penyisihan mikroplastik 17,2–22,2% terutama untuk mikroplastik dengan ukuran 1–5 μm.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

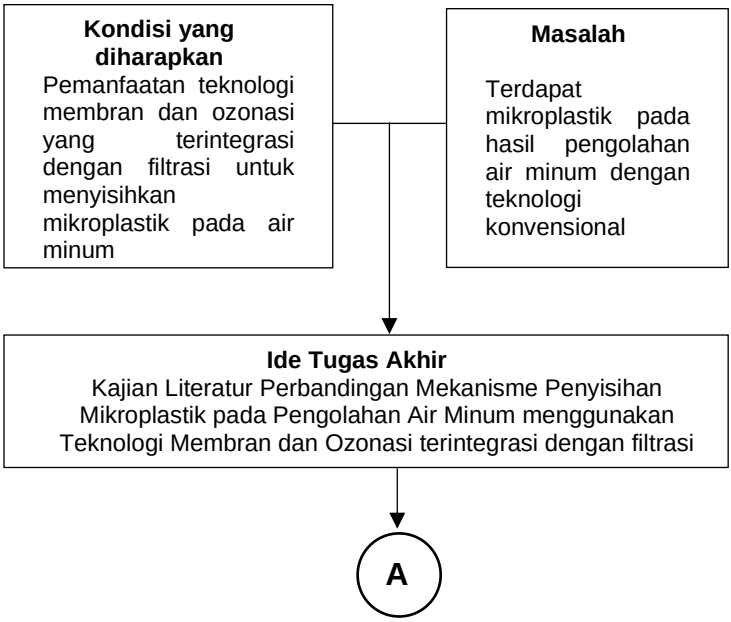
BAB 3

METODE STUDI

BAB III
METODE STUDI

3.1. Kerangka Studi

Kerangka studi merupakan tahapan mendapatkan dasar-dasar pemikiran untuk mencapai tujuan studi. Tujuan pembuatan kerangka studi adalah sebagai acuan proses pengambilan literatur, sehingga proses penulisan dapat berjalan secara sistematis. Adapun kerangka studi pada Gambar 3.1 berikut ini:



A

Rumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik dan jenis mikroplastik yang terdapat pada air minum?
2. Bagaimana mekanisme penyisihan mikroplastik pada pengolahan air teknologi membran dan ozonasi terintegrasi dengan filtrasi?
3. Bagaimana keunggulan dan kelemahan penyisihan mikroplastik pada pengolahan air teknologi membran dan ozonasi terintegrasi dengan filtrasi?

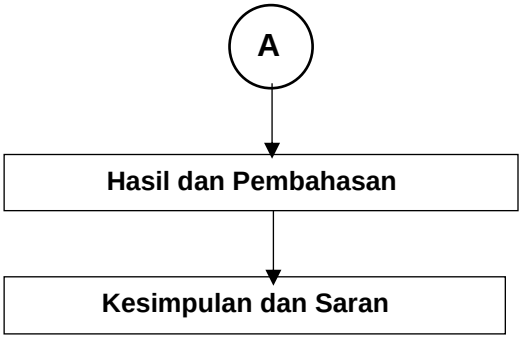
Tujuan

1. Menentukan karakteristik dan jenis mikroplastik yang terdapat pada air minum
2. Membandingkan mekanisme penyisihan mikroplastik pada pengolahan air minum menggunakan teknologi membran dan ozonasi terintegrasi dengan filtrasi
3. Membandingkan keunggulan dan kelemahan penyisihan mikroplastik pada pengolahan air minum menggunakan teknologi membran dan ozonasi terintegrasi dengan filtrasi

Pengumpulan Data

Literatur yang dikumpulkan mengenai persen removal mikroplastik, mekanisme penyisihan mikroplastik, karakteristik mikroplastik dan kelimpahan mikroplastik pada teknologi mikrofiltrasi, ultrafiltrasi serta ozonasi terintegrasi dengan filtrasi.

A



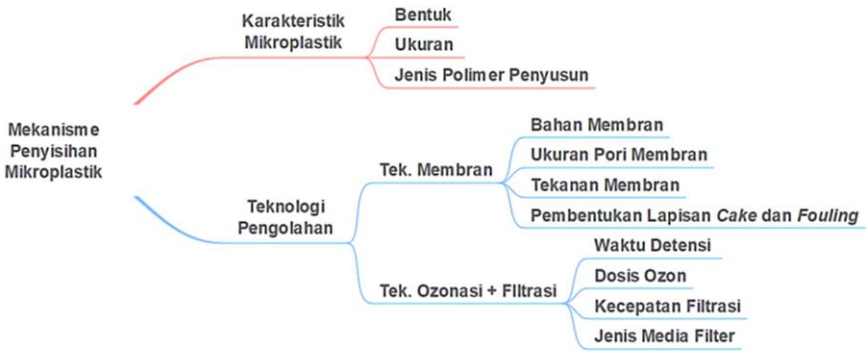
Gambar 3. 1 Kerangka Studi

3.2. Ide Studi

Ide studi dalam tugas akhir ini yaitu “Kajian Literatur Perbandingan Mekanisme Penyisihan Mikroplastik pada Pengolahan Air Minum Menggunakan Teknologi Membran dan Ozonasi Terintegrasi dengan Filtrasi”. Ide ini berawal dari permasalahan masih ditemukannya mikroplastik pada pengolahan konvensional sehingga diperlukan teknologi pengolahan untuk menghilangkan mikroplastik dalam air minum. Berdasarkan permasalahan tersebut perlu dilakukan kajian literatur untuk membandingkan teknologi yang paling tepat menyisihkan mikroplastik diantara teknologi membran dan teknologi ozonasi terintegrasi dengan filtrasi.

3.3. Alur Pikir Studi

Berdasarkan permasalahan dan ide studi dibuat alur pikir (*mind map)* untuk menentukan inti masalah yang akan dibahas pada studi literatur ini. Alur pikir studi diharapkan dapat mempermudah pengumpulan data dan literatur yang dibutuhkan untuk menunjang pembahasan serta menunjukkan keterkaitan antar topik. Adapun alur pikir dari studi literatur ini dapat dilihat pada Gambar 3.2



Gambar 3. 2 Alur Pikir Studi Literatur

Mekanisme penyisihan mikroplastik dipengaruhi karakteristik mikroplastik yang diolah dan teknologi pengolahan yang digunakan. Pada pengolahan air minum terdapat dua teknologi lanjut yang sering digunakan untuk menghilangkan mikroplastik dari dalam air yaitu teknologi membran dan teknologi ozonasi yang terintegrasi dengan filtrasi. Pada pengolahan dengan teknologi membran perlu mempertimbangkan bahan membran, ukuran pori, tekanan, serta pembentukan lapisan *cake* dan *fouling* untuk mengetahui mekanisme proses yang terjadi didalamnya. Sedangkan untuk teknologi ozonasi dosis dan waktu detensi merupakan faktor penting dalam proses pengolahan. Teknologi ozonasi terintegrasi dengan filtrasi untuk membantu meningkatkan efisiensi penyisihan akibat fragmentasi mikroplastik pada proses ozonasi. Pada proses filtrasi hal yang dipertimbangkan yaitu kecepatan filtrasi dan jenis media yang digunakan.

3.4. Metode Studi

Metode studi berisi rangkaian tahapan studi yang telah dilakukan mulai pendahuluan hingga memperoleh kesimpulan. Metode studi dibuat agar pelaksanaan studi lebih terarah dan mencapai tujuan. Penulisan dari studi pustaka disusun berdasarkan sistematika penulisan tugas akhir di bawah ini:

BAB 1: Pendahuluan
BAB 2: Tinjauan Pustaka
BAB 3: Metode Studi
BAB 4: Analisis data dan Pembahasan
BAB 5: Kesimpulan dan Saran

3.5. Pengumpulan Data dan Kajian Pustaka

Data dan pustaka yang dibutuhkan untuk menyusun kajian literatur ini didapatkan dari berbagai sumber pustaka. Sumber pustaka yang digunakan berasal dari artikel dan jurnal ilmiah nasional dan internasional, tugas akhir, tesis, disertasi, seminar ilmiah, serta karya ilmiah. Sumber pustaka yang dicari berhubungan dengan topik yang dibahas dan apabila literatur belum mencukupi digunakan buku ajar ataupun buku referensi. Jumlah literatur yang digunakan minimum 70 jenis berasal dari Indonesia maupun luar negeri. Referensi jurnal yang digunakan berasal dari website pencarian jurnal seperti *sciencedirect, researchgate, google scholar* dan website pencarian jurnal lainya serta perpustakaan.

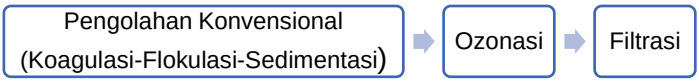
Literatur digunakan untuk melakukan pengumpulan data dan pustaka untuk menunjang analisis dan pembahasan. Data dan pustaka yang dikumpulkan untuk studi literatur ini adalah sebagai berikut:

1. Mengumpulkan data dan informasi tentang mikroplastik yang terdapat pada air minum secara umum, khususnya mengenai karakteristik mikroplastik (bentuk, jenis, warna, ukuran) serta sumber mikroplastik.
2. Mengumpulkan data dan informasi secara rinci tentang teknologi membran dan ozonasi yang terintegrasi dengan filtrasi meliputi:
   a) Mekanisme kerja kedua teknologi tersebut
   b) Aplikasi kedua teknologi tersebut dalam pengolahan air minum
   c) Potensi teknologi tersebut dalam pengolahan air minum untuk menghilangkan mikroplastik (efisiensi penyisihan mikroplastik dan kelimpahan mikroplastik (partikel/L)) pada setiap teknologi pengolahan

3. Mengumpulkan data dan informasi tentang keunggulan dan kelemahan kedua teknologi tersebut (persamaan dan perbedaan unit-unit proses yang digunakan serta perannya dalam penyisihan mikroplastik).

Pengolahan teknologi membran maupun teknologi ozonasi terintegrasi dengan filtrasi dilakukan setelah pengolahan dengan teknologi konvensional. Teknologi membran yang dibahas yaitu membran mikrofiltrasi dan membran ultrafiltrasi. Adapun diagram alir gambaran letak unit pengolahan teknologi membran dapat dilihat pada Gambar 3.3 dan diagram alir pengolahan teknologi ozonasi terintegrasi dengan filtrasi dapat dilihat pada Gambar 3.4. Teknik analisis data yang digunakan dalam tugas akhir ini yaitu analisis data secara deskriptif. Penggambaran data yang dikumpulkan berupa tabel beserta paragraf gambaran penjelasan.

Gambar 3. 3 Diagram Alir Proses Pengolahan Air Minum dengan Teknologi Membran.



Gambar 3. 4 Diagram Alir Proses Pengolahan Air Minum dengan Teknologi Ozonasi Terintegrasi dengan Filtrasi.

3.6. Hasil dan Pembahasan

Untuk mempermudah penyusunan tugas akhir ini, diperlukan *outline* studi literatur. Berikut merupakan *outline* kajian literatur tugas akhir ini:

BAB 1 Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

1.2 Rumusan Masalah

1.3 Tujuan Studi Literatur
1.4 Manfaat
1.5 Ruang Lingkup

BAB 2 Tinjauan Pustaka
2.1 Karakteristik Mikroplastik
2.2 Sumber Mikroplastik
2.3 Dampak Mikroplastik
2.4 Teknologi Membran
2.4.1 Mikrofiltrasi
2.4.2 Ultrafiltrasi
2.5 Teknologi Ozonasi Terintegrasi dengan Filtrasi
2.6 Penelitian Terdahulu

BAB 3 Metode Studi
3.1 Kerangka Studi
3.2 Metode Studi
3.2.1 Ide Studi
3.2.2 Pengumpulan Data
3.2.3 Hasil dan Pembahasan
3.2.4 Kesimpulan dan Saran

BAB 4 Hasil dan Pembahasan
4.1 Karakteristik mikroplastik di Air Minum
4.1.1 Karakteristik Fisik Mikroplastik
4.1.2 Identifikasi Polimer dan Kemungkinan Sumber Pencemar
4.2 Mekanisme Penyisihan Mikroplastik pada Pengolahan Air Minum Teknologi Membran dan Ozonasi Terintegrasi dengan Filtrasi
4.2.1 Mekanisme kerja pada masing-masing teknologi
4.2.2 Kemampuan dan aplikasi teknologi dalam menyisihkan mikroplastik
4.3 Perbandingan keunggulan dan kelemahan teknologi membran dan ozonasi terintegrasi dengan filtrasi dalam menyisihkan mikroplastik

BAB 5 Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

5.2 Saran

Hasil dan pembahasan pada bab 4 memuat data dan kajian dari hasil tabulasi dan pencarian yang sesuai dengan alur pikir studi. Pada sub bab 4.1 dibahas karakteristik mikroplastik di air minum meliputi bentuk, ukuran dan jenis polimer penyusun mikroplastik. Sub bab 4.2 membahas faktor-faktor yang mempengaruhi mekanisme proses penyisihan mikroplastik pada masing-masing teknologi. Sub bab 4.3 membahas kelebihan dan kelemahan dalam penyisihan mikroplastik yang ditinjau dari faktor teknis maupun non-teknis.

3.7. Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan merupakan jawaban dari tujuan studi literatur yang didapatkan dari hasil analisis dan pembahasan dengan sumber berbagai literatur. Saran berisi hal-hal yang masih dapat dikembangkan lebih lanjut untuk perkembangan informasi di masa mendatang.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Karakteristik dan Kelimpahan Mikroplastik pada Air Minum

Karakteristik mikroplastik dapat diidentifikasi secara fisik dan kimiawi. Karakteristik fisik meliputi bentuk warna dan ukuran, sedangkan karakteristik kimiawi yaitu polimer penyusun partikel mikroplastik. Identifikasi mikroplastik secara fisik dapat dilakukan secara konvensional dengan mata telanjang maupun dengan bantuan mikroskop, sedangkan identifikasi secara kimia dapat dilakukan dengan *spectroscopy* dan *thermal analysis* (Shim *et al.,* 2016). Metode identifikasi mikroplastik yang berbeda dapat menghasilkan kelimpahan yang berbeda untuk sampel yang sama (Song *et al.,* 2015). *Fourier transform infrared* (FTIR) dan *Raman spectroscopy* merupakan metode *spectroscopy* yang paling sering digunakan dalam identifikasi jenis polimer (Käppler *et al.,* 2016).

Menurut Loder *and* Gertds (2015), pada proses identifikasi menggunakan *Raman spectroscopy*, sampel akan ditembakkan dengan laser monokromatik yang memiliki panjang gelombang 500-800 nm. Interaksi sinar laser dengan molekul dan atom sampel (getaran, rotasi, dan interaksi berfrekuensi rendah lainnya) menghasilkan perbedaan frekuensi cahaya pantulan yang akan dibandingkan dengan frekuensi laser yang ditembakkan. Sedangkan pada metode FTIR menurut Kappler *et al.* (2016), sampel diradiasikan dengan cahaya inframerah (panjang gelombang 400–4000 cm^{-1} untuk inframerah jarak menengah). Sebagian radiasi cahaya inframerah akan diserap bergantung pada struktur molekul sampel dan akhirnya diukur dalam mode refleksi.

Kelimpahan mikroplastik di Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) dipengaruhi perubahan musim, dimana saat musim hujan kelimpahan mikroplastik cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan musim kemarau (Kankanige *and* Babel, 2021). Banyaknya mikroplastik pada air produksi juga dipengaruhi oleh keberadaan

mikroplastik dalam air baku (Pivokonský *et al.,* 2018), serta unit pengolahan yang digunakan (Padervand *et al.,* 2020) Perbandingan jumlah kelimpahan mikroplastik di air baku dan air produksi dapat dilihat pada Tabel 4.1. Kelimpahan mikroplastik di air baku dipengaruhi oleh keadaan wilayahan dan perilaku penduduk di sekitar sumber air baku (Pivokonský *et al.,* 2020) Kelimpahan mikroplastik dengan air baku air sungai terbanyak terdapat di DWTP Cina sebesar 6614 ± 1132 partikel/L sedangkan, untuk sumber air baku yang berasal dari air tanah ditemukan 0 – 7000 partikel/L mikroplastik (Mintenig *et al.,* 2019; Wang *et al.,* 2020). Sementara itu kelimpahan mikroplastik terkecil terdapat di DWTP India dengan sumber air baku dari Sungai Gangga yaitu sebesar 17,88 partikel/L.

Tabel 4. 1 Perbandingan Kelimpahan Mikroplastik Pada Air Baku dan Air Olahan IPAM

No	Sumber	Negara	Air Baku	Metode Pengolahan	Metode Identifikasi	Kelimpahan (Partikel/L)	
						Air Baku	Air Produksi
1	Wang *et al.,* 2020	Cina	Sungai Yangtze	Koagulasi+ Flokulasi + Sedimentasi+ Filtrasi media pasir + Ozonasi terintegrasi filtrasi karbon aktif	Micro-raman spectroscopy	6614 ± 1132**	930 ± 72
2	Pivokonský *et al.,* 2018	Republik Ceko	Reservoir Besar	DWTP 1: Koagulasi+ Flokulasi+ Filtrasi media Pasir	FTIR dan Raman spectroscopy	1473 ± 34	443 ± 10
			Reservoir kecil	DWTP 2: Koagulasi + Flokulasi + Sedimentasi + Filtrasi Pasir dan Karbon Aktif		1812 ± 35	338 ± 76
			Sungai	DWTP 3: Koagulasi + Flokulasi +Flotasi+ Filtrasi Pasir dan Karbon Aktif		3605 ± 497	628 ± 28
3	Mintenig *et al.,* 2019	Jerman	Air Tanah sedalam 30 m	Aerasi + Filtrasi	FTIR	0 – 7000	700
4	Sarkar *et al.,* 2021	India	Sungai Gangga	Praklorinasi+Koagulasi+Sedimentasi (Pulsator Clarifier) + Filtrasi Media Pasir		17,88*	2,75 ± 0.92
5	Mar'atush-olihah *et al.,* 2021	Indonesia	Kali Surabaya	Aerasi + prasedimentasi +Koagulasi + Flokulasi + Sedimentasi + Filtrasi+ Desinfeksi		54,4	13

No	Sumber	Negara	Air Baku	Metode Pengolahan	Metode Identifikasi	Kelimpahan (Partikel/L)	
						Air Baku	Air Produksi
6	Pivokonský *et al.,* 2020	Rep. Ceko	Bendungan Nýrsko	DWTP Milence: Koagulasi + Flokulasi + Filtrasi Karbon Aktif + Desinfeksi	Micro-Raman spectroscopy	23 ± 2	14±1
			Sungai Úhlava	DWTP Plzen: Pengaturan pH +Koagulasi +Flokulasi + Sedimentasi + Oksidasi (KMn04) + Filtrasi Pasir + Ozonasi + Filtrasi Karbon Aktif + UV + Stabilisasi Kapur+ Desinfeksi		1296 ± 35	151 ± 4
7	Kankanige and Babel, 2021	Thailand	Sungai Chao Phraya	Koagulasi + Flokulasi + Sedimentasi + Filtrasi media pasir dan antrasit + Klorinasi	ATR- FTIR spectroscopy and Raman spectroscopy	1590,8 ± 148,8	609.1 ± 84.7
8	Adib *et al.,* 2021	Iran	Sungai Karaj dan Kan	DWTP 1: screening + Koagulasi + Flokulasi + Filtrasi media pasir + Desinfeksi	Micro-Raman spectroscopy	2808 ± 80	1401 ± 86
			Sungai Jajrud	DWTP 2: screening + Koagulasi + Flokulasi + Filtrasi media pasir + Desinfeksi		1996 ± 268	1042 ± 269
			Bendungan Lar	DWTP 3: screening + Koagulasi + Flokulasi + Filtrasi media pasir + Desinfeksi		2172 ± 119	971±103

Keterangan:
* Kelimpahan mikroplastik terkecil di air permukaan
** Kelimpahan mikroplastik terbesar di air permukaan
± Standar deviasi

4.1.1.Karakteristik Fisik Mikroplastik

Mikroplastik dapat dikenali dengan beragam pengelompokan bentuk dari berbagai studi, mikroplastik berbentuk fragmen, *fiber* (serat), *film, foam* dan *pellet* (bola) adalah yang paling banyak dilaporkan (Koelmans *et al.,* 2019). Karakteristik fisik, kimia serta kelimpahan mikroplastik pada air hasil olahan IPAM dapat dilihat pada Tabel 4.2, dimana air sungai merupakan sumber air baku utama yang paling sering digunakan pada proses pengolahan air minum. Bentuk yang banyak ditemukan pada air minum adalah fragmen (Adib *et al.,* 2021). Fragmen merupakan partikel dengan bentuk seperti potongan puing dan mempunyai tepi yang licin atau bersudut atau datar (Lusher *et al.,* 2020). Fragmen juga merupakan bentuk yang paling sering ditemukan pada air hasil olahan DWTP Republik Ceko yaitu sebesar 70-80% dengan air baku berasal dari sungai, reservoir dan bendungan (Pivokonský *et al.,* 2018*,* 2020).

Fiber atau serat merupakan partikel dengan tampilan panjang dan tipis (ukuran serat diukur mengukur diameter serat) (Pivokonský *et al.,* 2018). Berdasarkan penelitian di Cina, *fiber* mendominasi air hasil olahan pada *Advanced Drinking Water Treatment Plant* (ADWTP) sebesar 53,9–73,9% dengan Sungai Yangtze sebagai air baku (Wang *et al.,* 2020). Di Thailand, Jerman, India dan Indonesia *fiber* juga menjadi bentuk dengan kelimpahan terbanyak (Kankanige and Babel, 2021; Mar'atusholihah *et al.,* 2021; Sarkar *et al.,* 2021). Kontaminasi *fiber* dapat disebabkan oleh keberadaan mikroplastik berbentuk *fiber* di air baku (Browne *et al.,* 2011; Novotna *et al.,* 2019) maupun hasil proses mekanik saat proses pengolahan air (Hidayaturaahman *and* Lee, 2019). Namun kontaminasi *fiber* juga dapat terjadi akibat penanganan sampel saat proses identifikasi mikroplastik (Mintenig *et al.,* 2019).

Distribusi ukuran mikroplastik bergantung pada kecepatan degradasi polimer penyusun plastik (Zhang *et al.,* 2015). Sampel mikroplastik dalam air dapat dikelompokkan berdasarkan ukurannya dengan pengayakan (Löder *and* Gerdts, 2015). Perbedaan pembagian penggolongan ukuran

pada mikroplastik dapat disebabkan oleh dua hal utama yaitu: alat yang digunakan selama pengambilan sampel dan cara pemrosesan sampel (Hidalgo-Ruz *et al.,* 2012). Hasil tabulasi data pada Tabel 4.2 menunjukkan pembagian *range* ukuran mikroplastik sangat beragam. Pada instalasi pengolahan yang bersumber dari air sungai ditemukan berbagai macam mikroplastik dengan ukuran <1 hingga >100 µm (Wang *et al.,* 2020; Pivokonský *et al.,* 2020), sedangkan pada instalasi pengolahan dengan sumber air baku berupa air tanah mikroplastik yang ditemukan memiliki kisaran ukuran yang sempit yaitu 50–150 µm (Mintenig *et al.,* 2019).

Sebagian besar penelitian mengenai karakteristik mikroplastik tidak meneliti warna mikroplastik yang terkandung dalam sampel. Pada penelitian karakteristik warna mikroplastik dengan Kali Surabaya sebagai air baku ditemukan bahwa biru merupakan warna partikel mikroplastik paling dominan pada air produksi (Mar'atusholihah *et al*., 2021). Pada air tanah warna partikel paling banyak mendominasi yaitu warna gelap transparan (Mintenig *et al.,* 2019)

Tabel 4. 2 Karakteristik Mikroplastik Pada Air Minum

No	Sumber	Negara	Air Baku	Metode Pengolahan	Karakteristik Mikroplastik Setelah Pengolahan				Metode Identifikasi
					Jenis Polimer	Bentuk	Warna	Ukuran (µm)	
1	Wang *et al*., 2020	Cina	Sungai Yangtze	Koagulasi+ Flokulasi + Sedimentasi+ Filtrasi media pasir + Ozonasi terintegrasi Filtrasi Karbon Aktif	PET* PE PP *Polyacrylamide*	*Fiber* * Fragmen Bola	-	>1–5 5–10 10–50 50–100 100	Micro-raman spectroscopy
2	Pivokonský *et al*., 2018	Republik Ceko	Reservoir Besar	DWTP 1: Koagulasi+ Flokulasi+ Filtrasi media Pasir	PP PAM PET*	Fragmen* Bola *Fiber*	-	1–5 5–10 10–50 50–100 >100	FTIR dan Raman spectroscopy
			Reservoir kecil	DWTP 2: Koagulasi + Flokulasi + Sedimentasi + Filtrasi Pasir dan Karbon Aktif	PP PAM PET* PVC	Fragmen* Bola *Fiber*	-	1–5 5–10 10–50 50–100 >100	FTIR dan Raman spectroscopy
			Sungai	DWTP 3: Koagulasi + Flokulasi +Flotasi+ Filtrasi Pasir dan Karbon Aktif	PP PAM PET PE*	Fragmen Bola *Fiber**	-	1–5 5–10 10–50 50–100 >100	FTIR dan Raman spectroscopy
3	Mintenig *et al.,* 2019	Jerman	Air Tanah sedalam 30 m	Aerasi + Filtrasi	Polyester* PVC PE PA Epoxy resin	*Fiber** Fragmen	Gelap Trans-paran	50-150	FTIR

No	Sumber	Negara	Air Baku	Metode Pengolahan	Karakteristik Mikroplastik Setelah Pengolahan				Metode Identifikasi
					Jenis Polimer	Bentuk	Warna	Ukuran (µm)	
4	Sarkar *et al.,* 2021	India	Sungai Gangga	Praklorinasi+ Koagulasi+Sedimentasi (Pulsator Clarifier) + Filtrasi Media Pasir	PE PP PET* PS	*Fiber** Fragmen	-	<25 25–50 50–100 >100	FTIR
5	Mar'atush-olihah *et al.,* 2021	Indonesia	Kali Surabaya	Aerasi + prasedimentasi +Koagulasi + Flokulasi + Sedimentasi + Filtrasi+ Desinfeksi	PES PET* LDPE PP* PS	*Fiber** Fragmen Film Pellet	Biru	1–100** 101–350 351–1 1– 5 (Peng *et al*., 2017)	FTIR
6	Kankanige and Babel, 2021	Thailand	Sungai Chao Phraya	Koagulasi + Flokulasi + Sedimentasi + Filtrasi Media Pasir dan Antrasit + Klorinasi	LDPE* PP PVC PS Polybutadiene PMMA PC PVF HDPE PA PET *Cellophane* *Polysilicate* PAM *Bakelite* Polimer lainnya	*Fiber** Fragmen Film Pellet	-	≥500 300-500 53-300 6,5 - 53	ATR- FTIR spectroscopy and Raman spectroscopy

No	Sumber	Negara	Air Baku	Metode Pengolahan	Karakteristik Mikroplastik Setelah Pengolahan				Metode Identifikasi
					Jenis Polimer	Bentuk	Warna	Ukuran (µm)	
7	Pivokons-ky *et al.,* 2020	Rep. Ceko	Bendung-an Nýrsko	DWTP Milence: Koagulasi + Flokulasi + Filtrasi Karbon Aktif + Desinfeksi	Selulosa Asetat* PET PVC PE PP.	*Fiber* Fragmen*	-	0,2-1 ≥1-5 ≥5-10 ≥10-50 ≥50-100 ≥100	Micro-Raman spectroscopy
			Sungai Úhlava	DWTP Plzen: Pengaturan pH +Koagulasi +Flokulasi + Sedimentasi + Oksidasi (KMn04) + Filtrasi Pasir + Ozonasi + Filtrasi Karbon Aktif + UV + Stabilisasi Kapur+ Desinfeksi		*Fiber** Fragmen	-		
8	Adib *et al*., 2021	Iran	Sungai Karaj dan Kan	DWTP 1: Penyaringan + Koagulasi + Flokulasi + Filtrasi media pasir + Desinfeksi	PP* PET PE PS PTFE *Polyurethane* *Polyamide* (PA) *Polybutylene terephthalate* (PBT) *Polyvinylidene Fluoride* (PVDF) PVC *Polycarbonate*	*Fiber* Fragmen* Pelet	-	>1	Micro-Raman spectroscopy
			Sungai Jajrud	DWTP 2: Penyaringan + Koagulasi + Flokulasi + Filtrasi media pasir + Desinfeksi					
			Bendung-an Lar	DWTP 3: Penyaringan + Koagulasi + Flokulasi + Filtrasi media Pasir + Desinfeksi					

Keterangan:
* Kelimpahan mikroplastik terkecil di air permukaan
** Kelimpahan mikroplastik terbesar di air permukaan
± Standar deviasi

4.1.2. Identifikasi Polimer dan Kemungkinan Sumber Kontaminasi

Berdasarkan karakteristik mikroplastik dalam air minum hasil olahan dapat perkirakan kemungkinan sumber pencemar mikroplastik. Berbagai jenis polimer seperti *Polyethylene Terephthalate* (PET), *Polypropylene* (PP), *Polyester* (PE), *Low Density Polyethylene* (LDPE) dan selulosa asetat ditemukan sebagai polimer terbanyak ditemukan pada air minum hasil olahan. Menurut Zarfl (2019), kelimpahan mikroplastik dengan jenis polimer tertentu di lingkungan bergantung pada jumlah produksi, pola penggunaan, jalur emisi, serta kerentanan material terhadap fragmentasi sehingga menjadi mikroplastik. Menurut studi yang dilakukan Mar'atusholihah *et al.* (2021), Sarkar *et al.* (2021) dan Wang *et al.* (2020), PET menjadi polimer yang paling sering ditemukan dalam air hasil olahan. PET banyak digunakan pada botol kemasan sekali pakai (Winkler *et al.,* 2019) serta dalam produksi tekstil, seperti pakaian, selimut, dan bulu domba (Wang *et al.,* 2017). PET di dalam air paling banyak berbentuk *fiber*, dan bentuk ini adalah yang paling mudah tersisihkan saat proses koagulasi-flokulasi karena mudah teraglomerasi dan terpresipitasi (Wang *et al.,* 2020).

Penelitian di Republik Ceko menunjukkan bahwa selulosa asetat adalah jenis polimer paling dominan pada air hasil olahan (Pivokonský *et al*., 2020). Selulosa asetat merupakan polimer yang banyak digunakan dalam produksi tekstil, lapisan plastik dan filter rokok (Law, 2004; Pulls *et al.,* 2011). Mikroplastik dengan jenis polimer selulosa asetat juga ditemukan di air limbah (Akarsu *et al.,* 2020). Menurut studi yang dilakukan di Iran *polypropylene* (PP) merupakan polimer yang paling sering ditemukan dalam air produksi (Adib *et al.,* 2021). PP banyak dijumpai pada kemasan makanan, sistem perpipaan (Pivokonský *et al.,* 2018), mainan, ember, peralatan makan (Karuniastuti, 2013), suku cadang otomotif, pakaian musim dingin dan peralatan laboratorium (Boyle *and* Ormeci, 2020). Penelitian pada air hasil olahan DWTP Jerman oleh

Mintenig *et al.* (2019), menunjukkan bahwa polimer jenis *polyester* paling dominan. *Polyester* digunakan sebagai bahan produksi pakaian serta menyebabkan pencemaran dan mikroplastik berbentuk *fiber* pada wilayah perairan (Browne *et al.,* 2011; Cai[a] *et al.,* 2020). Menurut Kankanige and Babel (2021), jenis polimer yang paling banyak ditemukan di DWTP Thailand adalah *Low Density Polyethylene* (LDPE). LDPE merupakan polimer dengan kode resin nomor 4 yang biasa digunakan dalam plastik kemasan makanan, pelapis susu karton, dan bahan pelapis gelas kopi sekali pakai (Boyle *and* Ormeci, 2020; Karuniastuti, 2013).

Densitas mikroplastik mempengaruhi daya apung dan distribusi mikroplastik dalam air (Crawford *and* Quinn, 2017). Mikroplastik dengan jenis polimer penyusun PE dan PET memiliki densitas relatif tinggi dibandingkan air sehingga akan cenderung tenggelam dalam air. Sedangkan mikroplastik dengan polimer penyusun LDPE memiliki densitas 0,92–0,94 gr/cm^3 sehingga, cenderung melayang dalam air. PP memiliki densitas antara 0,88 – 1,23 gr/cm^3 yang membuat partikelnya dapat melayang maupun tenggelam dalam air. Mikroplastik berbentuk *fiber* atau serat dapat berasal dari serat pakaian non katun yang ikut terbawa pada air saat proses pencucian (Browne *et al.,* 2011) maupun sisa pecahan peralatan pancing seperti jaring dan kail (Cole *et al.,* 2011). Mikroplastik berbentuk fragmen pada air baku, umumnya berasal dari pelapukan dan degradasi plastik yang lebih besar (Cole *et al.,* 2011). Mikroplastik berbentuk fragmen kemungkinan berasal dari kemasan produk maupun wadah berbahan plastik (Zhang *et al.,* 2015). Mikroplastik berbentuk pellet diduga berasal dari *microbeads* yang diproduksi untuk produk perawatan tubuh dan kosmetik (Cheung *and* Fok., 2015; Napper *et al.,* 2015) serta bahan baku produksi plastik (Eerkes-Medrano *et al.,* 2015).

4.2. Mekanisme Penyisihan Mikroplastik pada Pengolahan Air Minum Teknologi Membran dan Ozonasi Terintegrasi dengan Filtrasi

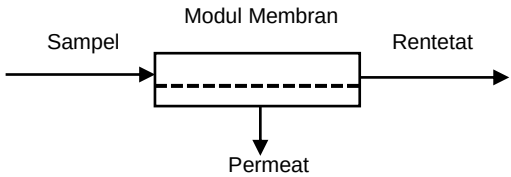
Tahap pengolahan pada air minum sangat bergantung pada kualitas air baku dan kualitas *effluent* yang diinginkan. Semakin buruk kualitas air baku, semakin kompleks unit pengolahan yang diperlukan. Mikroplastik dalam air datang bersama polutan lainnya seperti TSS, zat organik, logam berat, alga, bakteri (Godoy *et al.,* 2019; Novotna *et al.,* 2019). Unit pengolahan pada IPAM dan IPAL tidak didesain secara spesifik untuk menghilangkan mikroplastik melainkan untuk berbagai polutan lain dalam air (Novotna *et al.,* 2019; Sol *et al.,* 2020). Pada IPAM Karangpilang di Indonesia digunakan unit *pretreatment* berupa *cascade aerator* dan bak prasedimentasi yang ternyata memiliki efisiensi penyisihan mikroplastik berturut-turut 62,17% dan 33,33% (Mar'atusholihah *et al.,* 2020). P*re-treatment* berupa *bar-screen* dan *grit chamber* menyisihkan mikroplastik pada air limbah dengan efisiensi sebesar 35-59% (Sun *et al.,* 2018).

Teknologi membran ultrafiltrasi banyak digunakan sebagai pengolahan lanjutan (tersier) pada air minum atau sebagai *pre-treatment* sebelum teknologi *reverse osmosis* (Cuartucci, 2020; Poerio *et al.,* 2019). Teknologi ozonasi dapat digunakan sebagai *pre-treatment* pada pengolahan air limbah dan pengolahan lanjutan pada pengolahan air minum (Dalmau-Soler *et al.,*2021; Wang *et al.,* 2020). Sedangkan teknologi filtrasi pada umumnya digunakan setelah penerapan teknologi konvensional (Kankanige *and* Babel, 2021; Pivokonský *et al.,* 2018, Wang *et al.,* 2020). Secara umum digunakan teknologi konvensional yang terdiri atas koagulasi, flokulasi, sedimentasi dan filtrasi untuk menyisihkan mikroplastik pada air minum (Wang *et al.,* 2020). Koagulasi flokulasi dengan alum sebagai koagulan dapat menyisihkan MP hingga 62% (Pivokonský *et al.,* 2020). Teknologi membran maupun teknologi ozonasi terintegrasi dengan filtrasi biasa digunakan sebagai pengolahan lanjutan, sehingga efisiensi penyisihan pada kedua teknologi dipengaruhi oleh tahap pengolahan sebelumnya.

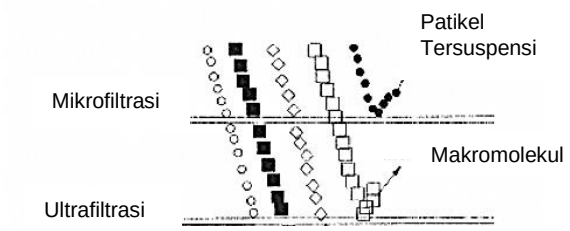
4.2.1.Mekanisme Kerja pada Masing-masing teknologi

Dalam proses berbasis membran, komponen tertentu dipisahkan/ditolak dari larutan sampel dengan menggunakan tekanan, listrik dan perbedaan konsentrasi sebagai penggerak (Madhura *et al.,* 2018). Menurut Mulder (1996), terjadi pemisahan pada zat yang diumpankan menjadi permeat dan retentat. Permeat merupakan zat yang melewati membran sedangkan rentetat adalah zat yang tertahan oleh membran. Proses pemisahan pada membran dapat dilihat pada Gambar 4.1. Mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi merupakan membran dengan proses pemisahan secara fisik, dimana mekanisme pemisahannya berupa penyaringan berdasarkan perbedaan ukuran partikel serta memanfaatkan tekanan sebagai gaya pendorongnya (Madhura *et al.,* 2018; Mulder, 1996; Yamamura *et al.,* 2007).

Menurut Cheryan (1998), rentetat pada membran mikrofiltrasi adalah partikel tersuspensi dan air sementara permeatnya yaitu zat terlarut dan air. Pada membran ultrafiltrasi rentetatnya berupa molekul berukuran besar dan air, sedangkan permeatnya adalah molekul berukuran kecil serta air. Karakteristik pemisahan membran mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi ditunjukkan pada Gambar 4.2. Pada membran dengan mekanisme kerja berupa penyaringan, bentuk dan ukuran partikel dapat mempengaruhi kemampuan membran dalam pemisahan suatu zat (Baker, 2004).



Gambar 4. 1 Proses Pemisahan pada Membran Filter.
Sumber: Mulder (1996)



Gambar 4. 2 Pemisahan Membran Mikrofiltrasi dan Ultrafiltrasi
Sumber: Cheryan (1998)

Menurut Gao *et al.* (2011), pada proses penyaringan dalam membran dapat terjadi berbagai interaksi fisik, kimia dan biologis sebagai berikut:

- Penolakan secara fisik: kontaminan dengan ukuran lebih besar dari ukuran pori membran yang digunakan akan ditolak (tersaring), akan tetapi beberapa zat organik dapat teradsorpsi pada permukaan membran.
- Reaksi kimia: kontaminan dengan ukuran lebih kecil dari ukuran pori membran dapat dihilangkan, bergantung karakteristik membran, karakteristik zat pengotor (polaritas dan gugus fungsional zat) dan reaksi kimia yang terjadi dalam air.
- Degradasi biologis: kontaminan yang dapat terurai secara alami dapat dihilangkan, misalnya dengan menambahkan unit reaktor yang diintegrasikan dengan media filter (*membrane bioreactor*)

Ozon merupakan oksidator kuat yang sering digunakan untuk proses pemurnian air (Hidayaturrahman *and* Lee, 2019). Ozon dapat diperoleh dengan mengekstrak oksigen dari udara pada fase gas atau dihasilkan dari fase larutan melalui proses elektrokimia (Von-Gunten, 2007). Ozon merupakan molekul yang tidak stabil, sehingga produksi ozon dilakukan sesaat sebelum digunakan (Krisnawati *et al.,* 2014; Rodríguez *et al*., 2008). Ozon mengubah polutan dalam air menjadi bentuk tidak larut yang selanjutnya perlu dipisahkan

dengan proses penyaringan (Von-Gunten, 2007). Pada proses ozonasi pH sangat penting karena reaksi antara senyawa organik dengan ozon molekuler dan dengan pengoksidasi radikal melibatkan radikal hidroksil, dimana radikal hidroksil akan terbentuk secara efektif pada pH tinggi (Rodríguez *et al*., 2008).

Teknologi penyisihan dengan menggunakan filter terbagi atas dua jenis berdasarkan kedalamannya yaitu *depth-filter* dan *screen-filter* (Baker, 2004). Menurut Cheryan (1998), pada *depth-filter* pemisahan terjadi pada bagian dalam media filter diantara butiran media. *Depth-filter* terdiri atas berbagai media filter yang disusun dalam satu wadah dan beroperasi dengan sistem aliran *dead-end*. Sebaliknya, *screen-filter* memisahkan partikel dengan menahan partikel pada permukaan. struktur *screen-filter* biasanya lebih kaku, seragam dengan ukuran pori lebih akurat karena dikontrol saat fabrikasi. Membran filter dapat berupa *screen-filter* maupun *depth-filter,* sebaliknya filtrasi media berbutir termasuk depth-filter (Cheryan, 1998; Zhao *et al.,* 2013). Sebagian besar membran ultrafiltrasi merupakan *screen-filter*, sedangkan mikrofiltrasi merupakan *depth-filter* (Zhao *et al.,* 2013) *Depth filter* memiliki sistem aliran searah *(dead-end)* sedangkan membran filter dapat dioperasikan secara searah maupun silang *(cross-flow)* (Cheryan, 1998; Yang *et al.,* 2021; Pramanik *et al.,* 2021).

4.2.2. Kemampuan dan Aplikasi Teknologi dalam Penyisihan Mikroplastik

Terdapat dua perspektif mengenai cara evaluasi penyisihan mikroplastik. Pertama, dengan mengukur inlet dan outlet IPAM atau dengan menyelidiki efisiensi penyisihan di percobaan laboratorium dengan kondisi yang terkendali (Novotna *et al.,* 2020). Beberapa penelitian telah membahas aplikasi teknologi membran dalam menghilangkan mikroplastik untuk air limbah dan air laut sintetik. Namun untuk penelitian terkait aplikasi membran pada air minum, hingga kini belum ditemukan literatur terkait. Penelitian yang dilakukan Ma *et al.* (2018)

menunjukkan bahwa, membran ultrafiltrasi mampu menyisihkan mikroplastik dengan jenis polimer PE pada proses pengolahan air minum skala laboratorium di Cina. Pengolahan dengan membran ultrafiltrasi dilakukan setelah pengolahan dengan teknologi konvensional, menggunakan koagulan berbasis alum dengan efisiensi pengolahan yang cukup rendah yaitu dibawah 40%. Sedangkan penelitian oleh Yang *et al. (*2021) menunjukkan bahwa, ultrafiltrasi mampu menyisihkan partikel mikroplastik hingga 95% dari air limbah. Beberapa aplikasi teknologi membran dalam menyisihkan mikroplastik beserta spesifikasi membran terangkum pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Aplikasi Teknologi Membran dalam Menghilangkan Mikroplastik

No	Jenis Membran	Bahan Membran	Spesifikasi Membran	Pengolahan Pendahuluan	Sampel	Efisiensi Penyisihan (%)	Ukuran mikroplastik tersisihkan (µm)	Skala Percobaan	Sumber
1	Mikrofiltrasi	*Polypropylene*	Tipe Fabrikasi: *Hollow Fiber* Jenis aliran: *Cross Flow* Tekanan : 3 Psi Jumlah *Fiber*: 2200 Diameter Dalam: 0,35 mm Diameter Luar: 0,5 mm Panjang: 0,38 m Luas Permukaan Membran: 2,62 m2	Tidak ada	Air Laut Sintetik	99,3	>10	Laboratorium	Yaranal *et al.,* 2021
2	Mikrofiltrasi	*Polyvinylidene Difluoride* (PVDF) + PET	Membran diintegrasikan dengan aerator Jenis aliran: *Cross-flow* Ukuran Pori: 0,1 µm Diameter Dalam: 0,8 mm Diameter Luar: 1,9 mm Panjang: 0,485 m Lebar: 0,046 m Tinggi: 0,134 m Backwash *Flux*: 50-85 L/m2/Jam	*Grit Chamber*+ Tanki Aerasi+ *Secondary Clarifier*	Air Limbah	98,1 - 100	>1	Lapangan	Yahyanez had *et al.,* 2021

No	Jenis Membran	Bahan Membran	Spesifikasi Membran	Pengolahan Pendahuluan	Sampel	Efisiensi Penyisihan (%)	Ukuran mikroplastik tersisihkan (µm)	Skala Percobaan	Sumber
3	Ultrafiltrasi	*Polyethersulfone*	Tipe Fabrikasi: *Hollow Fiber* Tekanan : 0,725 Psi Jenis Aliran: *Dead-end* Ukuran Pori: 0,02 µm Diameter Dalam: 0,9 mm Luas Permukaan Filtrasi: 9 m2 Panjang: 1,2 m Maksimum TMP: 2,5 bars Flux: 60 L/m2/Jam	Tidak ada	Air Limbah	95	-	*Pilot plant*	Yang et al.,2021
4	Ultrafiltrasi	*Polyethersulfone*	Ukuran pori: 100 Kda Jenis Aliran: *Dead-end*	Tidak ada	Air Limbah Buatan	96	-	Laboratorium	Pramanik *et al*., 2021
	Mikrofiltrasi	*Polyvinylidene Difluoride* (PVDF)	Ukuran pori: 0,1 µm Jenis Aliran: *Dead-end*	Tidak Ada	Air Limbah Buatan	91	-	Laboratorium	

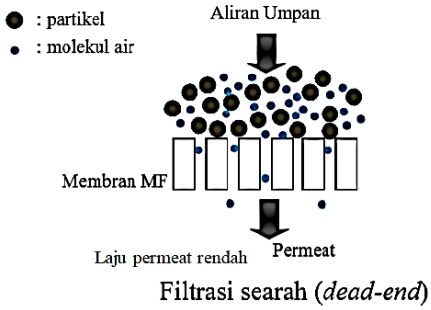
Fouling merupakan masalah utama pada pengoperasian membran karena dapat mengakibatkan penurunan efisiensi membran serta pemborosan energi sehingga pada akhirnya terjadi kenaikan biaya operasi dan pemeliharaan alat (Baker, 2004; Enfrin *et al.,* 2019; Gao *et al.,* 2011; Yaranal *et al.,* 2020). *Fouling* terjadi akibat pembentukan *cake*, penyempitan pori dan penutupan pori (Gao *et al.,* 2011). Pada pengolahan air berbasis membran, *fouling* dapat terjadi akibat fragmentasi mikroplastik yang berubah menjadi lebih kecil (Enfrin *et al*., 2020), maupun karena penggunaan koagulan yang menyebabkan terbentuknya lapisan *cake* pada permukaan membran (Ma *et al.,* 2019). Penggunaan teknologi membran yang didahului dengan koagulasi, membutuhkan dosis koagulan dan kondisi pengadukan yang tepat untuk menghasilkan flok yang optimal. Flok yang stabil dan mampu mengendap dengan baik pada saat sedimentasi membantu meringankan kinerja membran (Gao *et al.,* 2011).

Penggunaan dosis koagulan yang tinggi menyebabkan pembentukan flok yang lebih besar dan mempercepat resiko penyumbatan namun, peningkatan dosis juga dapat meningkatkan efisiensi penyisihan partikel mikroplastik berukuran kecil karena lebih mudah teradsorpsi (Ma *et al.,* 2019). Penelitian yang dilakukan Ma *et al.* (2019) menunjukkan bahwa, koagulan berbasis alum lebih baik dalam menghilangkan mikroplastik serta dapat memperlambat *fouling* pada membran dibandingkan dengan koagulan berbasis besi (Fe). Selain itu, sebagian partikel mikroplastik pada rentetat tidak dilepaskan sebagai permeat namun dapat teradsorpsi pada permukaan membran dan berpotensi menyumbat pori-pori membran yang mengakibatkan penurunan fluks (Enfrin *et al*., 2020).

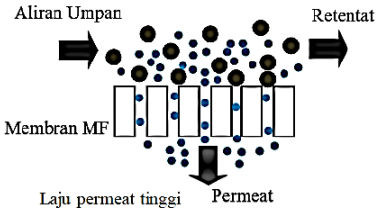
Beberapa upaya dapat dilakukan untuk memperlambat terjadinya *fouling* pada membran diantaranya melakukan *backwash* secara berkala, menggunakan pengolahan pendahuluan (*pre-treatment)*

untuk meningkatkan kualitas air yang akan di filter, menjaga kondisi operasi membran, mengintegrasikan membran dengan ozon serta melakukan pembersihan pada pori membran (Gao *et al.,* 2011; Yaranal *et al.,* 2020; Zhang *et al.,* 2013). Pembersihan pori membran pada umumnya menggunakan bahan kimia, pemilihan bahan pembersih yang tepat dapat memperpanjang masa pakai membran (Gao *et al.,* 2011). Penggunaan ozon dosis 2,0 ~ 2,5 mg/L yang terintegrasi dengan membran ultrafiltrasi dapat memperlambat proses *fouling* hingga dua kali lipat dibandingkan tanpa ozon (Zhang *et al.,* 2013). Selain menjadi permasalahan utama pada membran, terjadinya *fouling* juga merupakan indikator bahwa benar-benar terjadi pemisahan partikel pada membran.

Mode operasi pada membran dapat dibagi menjadi dua yaitu mode filtrasi aliran searah (*dead-end*) atau mode filtrasi aliran silang (*cross-flow*). Filtrasi aliran searah ditunjukkan pada Gambar 4.3 dimana cairan umpan masuk dengan arah tegak lurus terhadap permukaan membran. Sedangkan, filtrasi aliran silang yaitu masuknya cairan umpan mengalir sejajar dengan aliran cairan produk (*tangential flow*), seperti pada Gambar 4.4 (Salahudin dan Wibisono, 2019).



Gambar 4. 3 Mode operasi aliran searah pada membran
Sumber: Salahudin dan Wibisono (2019)



Filtrasi aliran silang (*cross-flow*)

Gambar 4. 4 Mode operasi aliran silang pada membran
Sumber: Salahudin dan Wibisono (2019)

Berdasarkan Tabel 4.3 terlihat bahwa membran yang dioperasikan dengan tipe aliran silang memiliki efisiensi lebih tinggi (98 – 100 %) sedangkan tipe aliran searah memiliki efisiensi penyisihan lebih rendah yaitu (91 – 96%). Pemilihan tipe aliran juga dapat menjadi salah satu pertimbangan untuk memperpanjang masa pakai membran. Membran filter yang beroperasi dengan aliran silang (*cross-flow*) memiliki peralatan yang lebih kompleks sehingga, masa pakainya lebih lama dibandingkan membran tipe aliran searah (Baker, 2004). Menurut Cheryan (1998), *cake* pada membran dengan sistem aliran *dead-end* lebih tebal dan lebih lekat pada permukaan pori membran seiring dengan berjalannya waktu, sehingga lambat laun akan menyebabkan penurunan *flux* membran yang menyebabkan kebutuhan tekanan dan energi yang lebih besar. Sedangkan pada sistem aliran *cross-flow*, *cake* akan lebih tipis dan akan mencapai titik tertentu hingga tidak mengalami penambahan ketebalan yang signifikan. Perbedaan operasi membran dengan aliran *dead-end* dan *cross-flow* dapat dilihat pada Tabel 4.4

Tabel 4. 4 Perbandingan Membran dengan Sistem Operasi *Dead-End* Dan *Cross-Flow*

No	Jenis Membran	Aliran Searah *(Dead-End)*	Aliran Silang *(Cross-Flow)*	Sumber
1	Mikrofiltrasi	Biaya operasi lebih tinggi, membran harus diganti setiap penggunaan tertentu	Biaya operasi lebih terjangkau, jangka waktu penggunaan membran lebih lama bergantung pada pembersihan pori membran	Baker, 2004
2		Operasional sederhana, tidak ada penggantian *spare part*	Operasional lebih kompleks, memerlukan pembersihan secara berkala	
3		Cocok untuk larutan dengan viskositas rendah	Lebih cocok untuk cairan yang mengandung padatan tinggi, biaya operasi bergantung pada konsentrasi larutan yang diumpankan	
4	Ultrafiltrasi	Konsumsi daya yang relatif rendah, biasanya sekitar 0,02 - 0,05 kWh/m3	Konsumsi energi relatif tinggi hingga beberapa kWH, karena penggunaan pompa ganda	Cuartucci, 2020
5		Bentuk relatif lebih kecil, lebih sederhana dan *compact*	Bentuk lebih besar dan rumit dibandingkan tipe *dead-end*	
6		Aliran lebih tenang dan resiko perubahan bentuk partikel lebih kecil	Gaya geser yang terjadi akibat aliran silang dapat merusak partikel yang ada dalam umpan	
7		Pembentukan *cake* lebih cepat dan *cake* dan cenderung lebih tebal	Pembentukan *cake* lebih lambat dan *cake* yang terbentuk lebih tipis	

Selain *fouling,* abrasi membran juga menjadi aspek yang dihindari dalam pengoperasian teknologi membran. Abrasi permukaan membran disebabkan oleh ketidakberaturan bentuk mikroplastik dan semakin parah apabila membran dioperasikan dalam tekanan tinggi (Pizzichetti *et al.,* 2021). Penggunaan cairan pembersih membran yang bersifat oksidator kuat seperti NaOH, H_2O_2, NaClO dapat ikut melarutkan permukaan membran berbahan polimer sintetik dan diikuti dengan penggetasan membran serta pelebaran pada pori membran (Ding *et al.,* 2021; Robinson *et al.,* 2016). Frekuensi penggunaan oksidator pembersih membran mempengaruhi umur membran. Penggunaan membran dengan bahan keramik dapat memperlama masa pakai, karena ketahanannya terhadap oksidator lebih baik dibandingkan membran jenis lainnya (Zhang *et al.,* 2013).

Menurut Cai[b] *et al.* (2020), bentuk struktur membran filter mempengaruhi efisiensi penyisihan mikroplastik dengan bentuk tertentu. Membran dengan tipe pori berlapis ganda *(double-layer-hole)* lebih efektif untuk menyisihkan mikroplastik berbentuk *fiber*. Mikroplastik berbentuk *fiber* cenderung lebih mudah tertahan pada pada membran berbahan campuran selulosa, nilon ataupun kapas yang memiliki bentuk pori melengkung dan dalam. Penggunaan membran filter dengan pori dangkal dan lurus seperti pada membran berbahan polikarbonat pada umumnya akan mempermudah mikroplastik berbentuk *fiber* lolos. Untuk menyisihkan mikroplastik berbentuk fragmen direkomendasikan menggunakan membran dengan pori yang tidak rata seperti membran berbahan kapas dan campuran selulosa. Secara keseluruhan membran dengan lubang pori berlapis ganda/banyak memiliki efisiensi penyisihan mikroplastik yang lebih tinggi baik untuk partikel berbentuk *fiber*, fragmen maupun *pellet* dibandingkan membran lubang pori satu lapis (*single-layer-hole*).

Jenis bahan membran sintetik yang banyak digunakan secara komersial yaitu *polycarbonate* (PC), selulosa asetat, dan *polytetrafluoroethylene* (PTFE). Pizzichetti *et al.* (2021) melakukan penelitian mengenai bahan membran terbaik diantara ketiga bahan tersebut dengan penurunan fluks, tekanan membran dan efisiensi membran sebagai parameter pembanding. Membran berbahan PC memiliki persentase paling lebih rendah dalam menyisihkan partikel mikroplastik dengan jenis polimer PA dan PS. Membran PTFE memiliki perubahaan penurunan fluks paling tinggi diantara kedua membran tersebut. Sedangkan, membran berbahan PC mengalami delta penurunan tekanan membran terbesar dibanding kedua bahan lainnya. Sehingga dapat disimpulkan diantara ketiga bahan tersebut selulosa asetat memiliki performa paling optimal dalam keseimbangan antara kecepatan aliran dan tekanan membran dan efisiensi penyisihan mikroplastik.

Efisiensi penyisihan mikroplastik pada teknologi membran sangat tergantung pada daya tahan, fluks influen, ukuran, kelimpahan mikroplastik dan bahan membran (Padervand *et al*., 2020; Pizzichetti *et al.,* 2021). Membran berbahan partikel yang bersifat hidrofilik akan cenderung menarik mikroplastik dengan sifat hidrofilik juga, begitu pula sebaliknya (Pizzichetti *et al.,* 2021). Pada umumnya membran dengan bahan dasar yang bersifat hidrofilik akan lebih tahan terhadap penyumbatan dibandingkan dengan membran berbahan dasar hidrofobik (Baker, 2004). Pemilihan karakteristik membran perlu diperhatikan untuk menghindari resiko timbulnya mikroplastik-nanoplastik dari penggunaan membran, maupun kemungkinan lolosnya partikel mikroplastik yang lebih besar dibanding permukaan membran (Ding *et al.,* 2021; Pizzichetti *et al.,* 2021).

Berdasarkan Wang *et al.* (2020), DWTP Cina menggunakan teknologi konvensional dan dilanjutkan dengan ozonasi terintegrasi dengan filtrasi untuk menghilangkan mikroplastik. Dalam tangki ozonasi terjadi peningkatan kelimpahan mikroplastik berukuran antara 1–5 µm sebesar 2,8 – 16%. Dampak negatif peningkatan kelimpahan mikroplastik dari proses ozonasi dapat teratasi pada tahapan filtrasi karbon aktif, terbukti pada tahap ini efisiensi penyisihan mikroplastik sebesar 56.8–60.9%. Peningkatan jumlah mikroplastik saat proses ozonasi ini diduga karena fragmentasi mikroplastik oleh gaya geser pada aliran air (Horton *et al.,* 2017). Penggunaan ozon sebelum filtrasi karbon aktif, mampu mengubah sebagian bahan organik menjadi bahan organik *biodegradable* yang dapat meningkatkan biodegradabilitas pada influen filter karbon aktif (Ross *et al.,* 2018). Sehingga secara keseluruhan proses ozonasi terintegrasi dengan filtrasi karbon aktif mampu meningkatkan efisiensi penyisihan mikroplastik sebesar 17,2–22,2% (Wang *et al.,* 2020). Namun pada studi yang dilakukan Wang *et al.* (2020), ditemukan bahwa sampel air hasil proses ozonasi terintegrasi dengan filtrasi karbon aktif, memiliki kelimpahan mikroplastik yang lebih besar dibandingkan kelimpahan pada air baku dan air hasil pengolahan dengan teknologi konvensional.

Tabel 4. 5 Efisiensi Penyisihan Mikroplastik dengan Teknologi Ozonasi Terintegrasi dengan Filtrasi

No	Pengolahan Pendahuluan	Efisiensi (%)	Keterangan	Sumber
1	Koagulasi+Flokulasi +Sedimentasi+ Filtrasi Media Pasir	17,22-22,2 *	Terjadi peningkatan mikroplastik (1–5 µm) sebesar 2,8 – 16% pada effluent ozonasi	Wang *et al.,* 2020
2	Koagulasi+flokulasi +Sedimentasi+ Filtrasi media pasir	18 ± 46% (Efisiensi Unit)	Konvensional = 0,14 ± 0,05 partikel/L Efluen Filtrasi = 0,13 ± 0,06 partikel/L	Dalmau-Soler *et al.,* 2021

*meningkatkan efisiensi

Pada proses ozonasi di air limbah ozon digunakan sebagai oksidan kuat untuk menghilangkan ion anorganik dan polutan organik yang lolos dari proses koagulasi (Hidayaturrahman *and* Lee, 2019). Kemungkinan bahan organik yang masih tersisa setelah proses koagulasi-flokulasi dan ozonasi akan ikut terbawa bersama mikroplastik dan akan lebih mudah hancur pada proses ozonasi (Obman *et al.,* 2018; Wang *et al.,* 2020). Ozon memiliki pengaruh positif pada proses degradasi polimer dalam air (Chen *et al.,* 2018). Reaksi ozon dengan polimer pada umumnya akan menyebabkan terbentuknya gugus fungsi dengan kandungan oksigen yang mampu mendegradasi rantai polimer (Hidayaturrahman *and* Lee, 2019). Oksidasi oleh ozon bermanfaat untuk penguraian polimer karena dapat memutus ikatan kovalen, menghasilkan ikatan silang dan reaksi pemotongan rantai (Boyle *and* Ormeci, 2020).

Paparan ozon ke polimer seperti PE, PP, dan PET dapat meningkatkan tegangan permukaan, hidrofilisitas dan sifat adhesi pada polimer (Hidayaturrahman *and* Lee, 2019). Pada penguraian polimer oleh ozon, apabila suhu semakin meningkat maka proses degradasi polimer akan semakin cepat (Cheng *et al.,* 2021). Apabila polimer terpapar ozon selama 60 menit dan pada suhu antara 35-45 ^{o}C akan menghasilkan laju degradasi polimer > 90% (Chen *et al.,* 2018). Pada IPAL di Korea tahap ozonasi dengan filtrasi menggunakan dosis 12,6 mg/L dan waktu radiasi selama satu menit mampu menghasilkan efisiensi penyisihan sebesar 89,9% (Hidayaturrahman *and* Lee, 2019).

Menurut Rodriguez *et al*. (2008), kemampuan ozon untuk mengoksidasi polutan dalam air bergantung pada konsentrasi ozon terlarut. Dimana konsentrasi ozon terlarut bergantung pada dekomposisi ozon, proses ini sangat kompleks dan dipengaruhi oleh karakteristik air baku seperti bahan organik dan anorganik terlarut, suhu, konsentrasi, pH, dan alkalinitas. Nabi *et al.* (2020) melakukan percobaan degradasi *polystyrene* melalui

fotokatalitik dengan TiO_2. Hasil percobaan menunjukkan reaksi degradasi *polystyrene* dalam keadaan padat diinisiasi oleh oksidator reaktif seperti OH^- dan O_2^-**.** Dimana sinar UV menstimulasi TiO_2 untuk memproduksi elektron pada *conduction band* (e^-_{CB}) dan pembentukan hole positif dalam orbit valensi (h^+_{VB}). Elektron pada *conduction band* (e^-_{CB}) yang dapat keluar dari orbit, bereaksi dengan oksigen dan membentuk superoksida radikal (persamaan 1). Kemudian superoksida radikal ini bereaksi dengan air dan membentuk $^{\cdot}OOH$ (peroksil radikal) yang menghasilkan hidrogen peroksida (persamaan 2 dan 3). Hidrogen peroksida akhirnya berubah menjadi $^{\cdot}OH$ (hidroksil radikal) (Persamaan 4), yang bereaksi dengan mikroplastik dan menyebabkan degradasi. Begitu pula dengan ozon, dalam air O_3 akan mengalami penguraian akibat bereaksi dengan ion hidroksida yang diikuti dengan pembentukan zat pengoksidasi radikal seperti $^{\cdot}OH$, $^{\cdot}HO_2$ dan $^{\cdot}HO_3$ yang mampu mengoksidasi berbagai polutan saat proses ozonasi (Rodríguez *et al.,* 2008).

$O_2 + e^-_{CB} \rightarrow O_2^{\cdot -}$ (Persamaan 1)

$O_2^{\cdot -} + H_2O \rightarrow {}^{\cdot}OOH + OH^-$ (Persamaan 2)

$2\,{}^{\cdot}OOH \rightarrow O_2 + H_2O_2$ (Persamaan 3)

$H_2O_2 \rightarrow 2\,{}^{\cdot}OH$ (Persamaan 4)

Sumber: Nabi *et al.* (2020)

Menurut Dalmau-Soler *et al.* (2021), DWTP Barcelona menerapkan pengolahan konvensional yang diikuti dengan dua pengolahan paralel yang berbeda. Tahap pengolahan paralel pertama berupa teknologi konvensional lanjut yang ditingkatkan (teknologi ozonisasi terintegrasi dengan filtrasi karbon aktif) sementara teknologi kedua menggunakan pengolahan lanjutan (teknologi membran ultrafiltrasi yang diikuti oleh *reverse osmosis*). Kelimpahan mikroplastik pada pengolahan konvensional adalah sebesar 0,14 ± 0,05 partikel/L sedangkan, pada efluen filtrasi terdapat 0,13 ± 0,06

partikel/L. Hal ini menunjukkan bahwa hasil pengolahan dengan ozonasi terintegrasi dengan filtrasi tidak menghilangkan mikroplastik secara signifikan sementara pada efluen teknologi membran kelimpahan mikroplastik yang lebih sedikit yaitu sebesar 0,06 ± 0,04 partikel/L. Sehingga didapatkan hasil efisiensi penyisihan mikroplastik dengan teknologi ozonasi terintegrasi dengan filtrasi karbon aktif di Barcelona ini sebesar 18 ± 46%.

Proses ozonasi dapat mempercepat proses degradasi mikroplastik dan meningkatkan kelimpahannya sehingga harus dipisahkan dengan penyaringan pada tahap selanjutnya yaitu filtrasi. Sembiring *et al.* (2021) mengungkapkan, terdapat proses yang terjadi saat menghilangkan partikel dalam filtrasi media berbutir yaitu:

1. Transportasi: proses dari gerak Brown.
2. Sedimentasi dan proses tarik menarik antar partikel.
3. Kemampuan melekat pada media yang dipengaruhi: tegangan mekanis, adsorpsi (fisik-kimia), proses biologi serta ketahanan partikel.

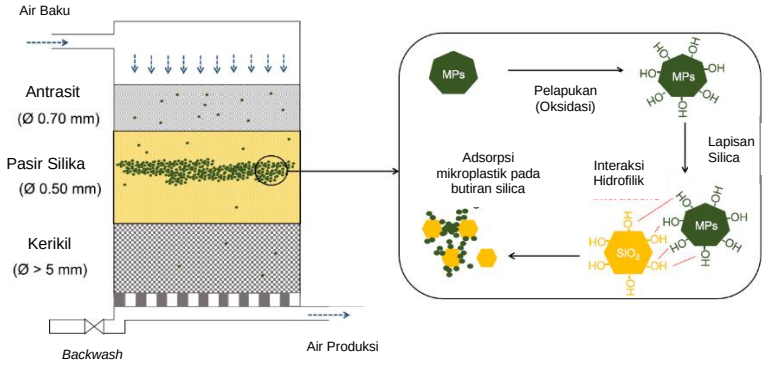
Unit filtrasi memiliki efisiensi yang cukup tinggi untuk menghilangkan mikroplastik dalam air hingga 55-95% (Cheng *et al.,* 2021; Mintenig *et al.,* 2019; Talvitie *et al.,* 2017). Salah satu jenis media filter yang sering digunakan setelah proses ozonasi adalah dengan menggunakan karbon aktif (Dalmau-Soler *et al.,* 2021; Wang *et al.,* 2020) dan filter media pasir (Hidayaturrahman *and* Lee, 2019). Waktu detensi pada filtrasi media pasir tidak mempengaruhi efisiensi penyisihan mikroplastik (Sembiring *et al.,* 2021). Perbandingan antara ukuran butir media filter menjadi faktor penentu penyisihan mikroplastik. Apabila ukuran partikel mikroplastik lebih kecil dibandingkan rongga antar media filter, maka partikel mikroplastik dapat lolos dan tidak tersaring (Hidayaturrahman *and* Lee, 2019). Filter media pasir pada umumnya digunakan untuk menghilangkan partikel dengan kisaran ukuran puluhan mikrometer (Novotna *et al.,* 2019).

Filtrasi karbon aktif setelah proses ozonisasi mampu menghilangkan kontaminan melalui kombinasi dari proses adsorpsi fisik dan biodegradasi (Zheng *et al.,* 2018). Penyisihan mikroplastik sangat bergantung pada sifat fisiknya, yaitu ukuran dan bentuknya (Wang *et al.,* 2020). Efektivitas filtrasi karbon aktif dalam menyisihkan mikroplastik dipengaruhi oleh polaritas mikroplastik (Cheng *et al.,* 2021). Filtrasi karbon aktif secara signifikan berkontribusi pada penyisihan mikroplastik terutama dengan bentuk fragmen dan *fiber* pada kategori ukuran antara ≥10 hingga 50 µm (Pivokonský *et al.,* 2020). Penelitian Zhang *et al.* (2020), melaporkan bahwa filtrasi karbon aktif mampu menyisihkan mikroplastik berukuran >100 µm dengan efisiensi 99,9%. Sementara pada penelitian Wang *et al.* (2020) ditemukan bahwa, filtrasi karbon aktif menyisihkan 73.7–98.5% mikroplastik berukuran 1-5 µm. Penggunaan karbon aktif sebagai media filter dapat meningkatkan pembentukan *biofilm* pada mikroplastik dan memperbesar kemungkinan *clogging* pada filter (Zhang *et al.,* 2020).

Jenis media filter lainnya yang banyak digunakan pada proses pengolahan air adalah filter media pasir silika (Adib *et al.,* 2021; Dalmau-Soler *et al.,* 2021; Wang *et al.,* 2020). Filtrasi media pasir memiliki efisiensi penyisihan 29,0–44,4% (Wang *et al.*, 2020) pada DWTP Cina, sebesar 60,2% pada DWTP Iran (Adib *et al.,* 2021). Mikroplastik pada proses filtrasi media pasir akan teradsorpsi atau terperangkap di butiran-butiran pasir (Talvitie *et al.,* 2017). Bentuk dan ukuran mikroplastik menjadi faktor penting dalam proses filtrasi. Filtrasi dengan media pasir mampu menghilangkan mikroplastik dengan ukuran >200 µm (Sembiring *et al*., 2021). Mikroplastik berbentuk *fiber* (serat) memiliki bentuk yang panjang dan menjadi bentuk paling banyak terperangkap dalam proses filtrasi dengan media pasir (Adib *et al.,* 2021).

Sembiring *et al.* (2021), melakukan penelitian dengan membandingkan kinerja filter media pasir skala laboratorium dalam menghilangkan partikel mikroplastik buatan, yang berasal dari kantong plastik dan serpihan ban. Efisiensi tertinggi pada filtrasi dengan media pasir sebesar 95,5% dengan kecepatan filtrasi 6 m/jam untuk media pasir dengan *effective size* (ES) 0,39 mm dan porositas 0,451. Sementara untuk media ES 0,68 mm efisiensi penyisihan tertinggi diperoleh saat kecepatan filtrasi 8 m/jam dan porositas 0,431. Proses filtrasi menggunakan media filter dengan ES 0,39 mm mampu menyaring partikel mikroplastik dengan ukuran 58,5 – 60,37 µm sedangkan partikel dengan nilai ES 0,68 mm mampu menyaring partikel 102-105 µm. Namun, dalam penelitian ini dinyatakan bahwa kecepatan filtrasi tidak berpengaruh dalam penyisihan mikroplastik.

Rapid Sand Filter (RSF) terdiri atas butiran antrasit, pasir silika dan kerikil. RSF merupakan jenis filter yang banyak digunakan dalam pengolahan air (Enfrin *et al.,* 2019; Sembiring *et al.,* 2021; Wang *et al.,* 2020). Menurut Enfrin *et al.* (2019), mikroplastik dengan ukuran mikroskopis mampu menembus lapisan antrasit dan tertahan pada lapisan pasir silika. Mikroplastik dalam perjalanannya akan mengalami pelapukan yang menghasilkan gugus hidroksil pada bagian permukaan. Permukaan spesifik pada mikroplastik yang telah mengandung gugus hidroksil dapat menginduksi gugus hidroksil lain dengan densitas yang lebih tinggi sehingga, menghasilkan interaksi yang lebih kuat dengan butiran silika melalui ikatan antar hidrogen. Ikatan tersebut akan mengurangi performa filter dan menghambat proses *backwash.* Interaksi mikroplastik dengan pasir silika di dalam filter dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 5 Interaksi antara Mikroplastik dan Pasir Silika pada *Rapid Sand Filter.*

Sumber: Enfrin *et al.* (2019)

Pada teknologi ozonasi terintegrasi dengan filtrasi, mikroplastik tidak hilang saat proses ozonasi melainkan berubah menjadi bentuk yang lebih kecil akibat pemutusan rantai polimer oleh ozon. Bagaimanapun, media filter memegang peranan penting dalam penyisihan mikroplastik. Penggunaan media filter dengan material yang lebih keras dari mikroplastik dapat berkontribusi pada fragmentasi mikroplastik di dalam unit filter (Enfrin *et al.,* 2019). Mekanisme penyisihan mikroplastik pada filter terjadi akibat penyaringan serta proses adsorpsi pada media filter karbon aktif, sedangkan pada media pasir hanya terjadi penyaringan secara fisik. Teknologi membran seperti ultrafiltrasi menunjukkan penyisihan mikroplastik yang lebih efektif dibandingkan ozonisasi terintegrasi dengan filtrasi karbon aktif (Dalmau-Soler *et al.,* 2021).

Dalam perjalanannya mikroplastik dapat menyerap berbagai zat dalam air seperti sisa polutan organik persisten dan logam berat (Godoy *et al.,* 2019). Sifat hidrofobisitas pada mikroplastik memungkinkan penyerapan produk samping terhalogenasi yang

dihasilkan dari produksi dan penggunaan bahan pembersih (Ding *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2018). Mekanisme penyisihan mikroplastik dapat dipengaruhi oleh polutan yang ikut terbawa bersama mikroplastik dalam air (Enfrin *et al.,* 2019). Aglomerasi mikroplastik mampu mengubah permukaan plastik secara kimiawi dan mempengaruhi densitas plastik, sehingga akan mempengaruhi daya apung mikroplastik dalam air (Rummel *et al.,* 2017). Daya apung mikroplastik dalam air dapat mempengaruhi proses penyisihan dalam unit pengolahan. Mikroplastik dengan daya apung rendah akan efektif hilang pada proses berbasis gravitasi seperti sedimentasi dan filtrasi, sedangkan mikroplastik dengan daya apung tinggi dapat dihilangkan dengan flotasi (Talvitie *et al.,* 2017.

Dari berbagai aspek yang ditinjau diatas dapat diketahui bahwa faktor yang mempengaruhi efisiensi penyisihan mikroplastik yaitu:

1) Sumber air baku
2) Karakteristik mikroplastik (bentuk dan ukuran mikroplastik dan jenis polimer penyusun plastik)
3) Interaksi partikel mikroplastik dengan senyawa lain di dalam air.
4) Kriteria desain setiap teknologi pengolahan
   - Ozon: dosis ozon, waktu kontak ozonasi, interaksi antara ozon dengan polimer dan polutan lain dalam air.
   - Filtrasi media berbutir: jenis media, periode *backwash*, jenis koagulan pada pengolahan sebelumnya
   - Teknologi membran: ukuran pori membran, bahan membran, bentuk membran, tipe aliran operasi membran, penggunaan dan periode pembersihan membran, lapisan membran

4.3. Perbandingan Keunggulan dan Kelemahan Teknologi Membran dan Ozonasi Terintegrasi dengan Filtrasi dalam Menyisihkan Mikroplastik

Pada proses ozonasi terjadi peningkatan kelimpahan mikroplastik akibat proses degradasi polimer mikroplastik sehingga dibutuhkan pemisahan pada tahap selanjutnya (*Wang et al.,* 2020). Ozon merupakan oksidator kuat yang cukup mahal dan bersifat reaktif sehingga penggunaannya memerlukan tenaga ahli (Wei *et al.,* 2016). Kerugian lainya dalam penggunaan ozon yaitu tingginya konsumsi energi dan terbentuknya produk samping pengoksidasi yang mungkin memiliki toksisitas yang sama dengan atau lebih besar dari ozon itu sendiri (Sol *et al.,* 2020). Selain bereaksi dengan polimer penyusun mikroplastik ozon juga dapat bereaksi dengan senyawa lain dalam air atau senyawa yang ikut terbawa dengan mikroplastik. Ozon tidak sepenuhnya mendegradasi semua polutan dan beresiko berubah menjadi senyawa lain yang biasanya tidak memiliki struktur aromatik (Baresel *et al.,* 2019). Senyawa seperti bikarbonat, ion karbonat, alkohol tersier dan beberapa asam humat dapat menghambat proses ozonisasi, senyawa tersebut mampu bereaksi dengan gugus hidroksil radikal tanpa meregenerasi anion superoksida (Rodriguez *et al.,* 2008). Pada proses ozonasi terintegrasi dengan filtrasi penyisihan mikroplastik hanya terjadi pada filtrasi. Proses ozonasi sendiri hanya, mendegradasi polimer mikroplastik menjadi bentuk yang lebih kecil tanpa menyisihkan mikroplastik.

Dalam proses ozonasi terintegrasi dengan filtrasi, proses filtrasi memiliki peran penting dalam menghilangkan mikroplastik. Filtrasi menggunakan mekanisme proses penyaringan dan adsorpsi pada permukaan filter untuk menyisihkan partikel mikroplastik (Talvitie *et al.,* 2017). Filtrasi dengan media pasir *silica* memiliki resiko penyumbatan lebih besar akibat interaksi hidrofilik antara butiran pasir dan partikel mikroplastik (Ahmed *et al.,* 2021; Enfrin *et al.,* 2019). Filter memerlukan penggantian media secara berkala serta *backwash* untuk meminimalisir penyumbatan filter dan menjaga kualitas efluen (Gao *et al*., 2011; Gibert *et al.*, 2011).

Menurut Enfrin *et al.* (2019), adsorpsi partikel mikroplastik pada media pasir *silica* menyebabkan partikel menempel dan sulit terlepas dari permukaan media. Interaksi antara mikroplastik dan pasir *silica* ini sulit dilepaskan karena keberadaan gugus hidroksil yang terbentuk akibat proses pelapukan mikroplastik oleh cuaca (Enfrin *et al.,* 2019). Filter dengan media karbon aktif memiliki resiko pembentukan *biofilm* lebih tinggi, sehingga dapat mempercepat *clogging* pada filter (Zhang *et al*., 2020). Pembentukan biofilm pada filter dapat merubah karakteristik pada permukaan mikroplastik dan mempengaruhi daya apung plastik (Lobelle *and* Cunliffe, 2011).

Kelemahan filter lainnya yaitu, selektivitas yang terbatas. Selektivitas bergantung pada diameter media filter dan ukuran partikel mikroplastik yang akan disisihkan (Hidayaturrahman *and* Lee, 2019). Unit filtrasi memiliki kecenderungan menghilangkan partikel mikroplastik dengan range ukuran >100 µm (Zhang *et al.,* 2020). Proses filtrasi dengan sistem *bed* terjadi gesekan antara media berbutir dengan partikel mikroplastik dan beresiko terjadi fragmentasi mikroplastik menjadi bentuk yang lebih kecil (Enfrin *et al.,* 2019; Sol *et al*., 2020). Residu pada pengoperasian filter berasal dari proses *backwash*, dimana residu yang dihasilkan sebanyak 2-5% dari air yang diproduksi, selain itu setelah *backwash* biasanya terdapat residu dari pencucian filter selama 15 – 60 menit awal (U.S. EPA, 2011).

Teknologi membran dan filtrasi media berbutir memiliki kesamaan yaitu beresiko memperkecil partikel mikroplastik (fragmentasi). Pada filtrasi media berbutir fragmentasi terjadi akibat gesekan yang terjadi antara partikel mikroplastik dengan partikel media filter (Enfrin et al., 2019; Sol et al., 2020). Sedangkan pada teknologi membran fragmentasi dapat terjadi akibat gaya geser pada aliran dalam membran (Cuartucci, 2020). Kekurangan lainnya pada teknologi membran diantaranya kemungkinan *fouling* baik akibat fragmentasi partikel mikroplastik (Pizzichetti *et al.,* 2021), adsorpsi partikel mikroplastik pada permukaan membran (Enfrin *et al.*, 2020), maupun akibat penggunaan dosis

koagulan yang tidak tepat (Ma *et al.,* 2019). Untuk filter berukuran kecil (ukuran pori <1 mm) seperti mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi, zat pengotor dalam sampel air cenderung menumpuk selama penyaringan dan membuat mikroplastik hampir tidak terlihat di permukaan filter (Cai[b] *et al.,* 2020).

Secara keseluruhan teknologi membran dengan mekanisme penyaringan seperti ultrafiltrasi dan mikrofiltrasi mampu menghilangkan mikroplastik secara efektif dengan efisiensi cukup tinggi hingga 100% (Yahyanezhad *et al.,* 2021). Akan tetapi selektivitas membran dalam menyisihkan partikel cenderung rendah bergantung pada ukuran pori membran yang digunakan (Mulder, 1996). Membran seperti ultrafiltrasi dan mikrofiltrasi akan menyisihkan mikroplastik dalam range yang relatif sama dengan ukuran pori membran (Baker, 2004; Enfrin *et al.*, 2019; Talvitie *et al.,* 2017). Semakin besar ukuran partikel dibandingkan dengan ukuran pori membran, maka kemungkinan membran mengalami *fouling* lebih tinggi (Baker 2004; Enfrin *et al.,* 2019; Mulder, 1996; Yaranal *et al.,* 2020).

Penggunaan membran seperti ultrafiltrasi dan mikrofiltrasi memerlukan perawatan khusus secara berkala untuk menjaga kualitas permeat sekaligus memperpanjang umur pakai membran (Baker, 2004). Perawatan yang harus dilakukan pada pengoperasian teknologi membran seperti *backwash* dan pembersihan pada permukaan pori membran secara berkala (Gao *et al.,* 2011). Periode *backwash* untuk memperlambat *fouling* biasanya dilakukan setiap 10 hingga 60 menit (Malmrose *et al*, 2003). Proses *backwash* dengan menggunakan cairan pembersih membran harus dilakukan dengan hati-hati dan dilakukan dalam periode tertentu karena dapat ikut melarutkan permukaan membran berbahan polimer sintetik (Ding *et al.,* 2021; Robinson *et al.,* 2016) dan menyebabkan abrasi membran sehingga menambah kelimpahan mikroplastik (Enfrin *et al.,* 2020).

Menurut Malmrose *et al.* (2003), residu pada membran berasal dari proses *backwash* dan pembersihan pori dengan bahan kimia. *Backwash* untuk membran dengan recovery (85-98%) memiliki *flow rate* sebesar 2-15% dari *flow rate* umpan

yang masuk ke instalasi. Sementara untuk *backwash* dengan penambahan bahan kimia memiliki residu sebesar 0,2-0,4 % dari *flow rate* instalasi. Untuk residu bulanan akibat pembersihan setempat dengan bahan kimia yaitu <0,05% dari *flow rate* instalasi. Pada umumnya pembersihan pori setempat *(clean in place*) dilakukan setiap 3-4 bulan. Membran dapat dioperasikan pada suhu ruang atau suhu yang lebih tinggi untuk mengurangi viskositas rentetat dan menghemat energi dan biaya yang digunakan untuk pemompaan (Cheryan, 1998). Menurut Cuartucci (2020), beberapa keunggulan penggunaan membran ultrafiltrasi dalam pemurnian air yaitu:

- Memiliki proses dan instalasi yang sederhana.
- Bersifat serbaguna, membran dapat dioperasikan secara otomatis dan dapat menghilangkan berbagai (polutan organik, alga bakteri, virus), mengurangi bau sehingga proses desinfeksi pada tahap selanjutnya akan mengalami penurunan beban pencemar, penghematan bahan kimia serta efisiensi energi.
- Memiliki residu yang lebih sedikit dibandingkan dengan pengolahan konvensional.
- Memiliki biaya operasi 5-10% lebih terjangkau dibanding pengolahan konvensional.
- Dapat dikombinasikan dengan unit pengolahan lain maupun digunakan sebagai pengolahan utama.

Plumlee *et al.* (2014) membuat persamaan dari kurva biaya operasional dan *maintenance* (O&M) untuk teknologi membran mikrofiltrasi/ultrafiltrasi, ozon dan filter karbon aktif. Seluruh biaya disesuaikan pada mata uang dolar tahun 2011 dan dirancang untuk instalasi dengan kapasitas pengolahan 1-500 MGD *(Million Gallon/Day*) atau sekitar 4.546,09–36.3687,24 m^3/hari. Hasil kurva biaya investasi dan operasional menunjukkan persamaan seperti pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 6 Persamaan Regresi Kurva Biaya pada Teknologi Ozon dan Membran

Unit	Biaya Investasi ($M/MGD)	Biaya O & M ($M/MGD)
Ozonasi	2,26 × Kapasitas pengolahan (MGD) $^{-0.54}$	0,0068 × Kapasitas pengolahan (MGD) $^{-0.051}$
Filter Karbon Aktif (EBCT 10 menit, 1-10 MGD)	2,92 × Kapasitas pengolahan (MGD) $^{-0.52}$	0,074 × Kapasitas pengolahan (MGD) $^{-0.19}$
Filter Karbon Aktif (EBCT 20 menit, 1-10 MGD)	3,03 × Kapasitas pengolahan (MGD) $^{-0.48}$	0,085 × Kapasitas pengolahan (MGD) $^{-0.16}$
Mikrofiltrasi/ Ultrafiltrasi	3.57 × Kapasitas pengolahan (MGD) $^{-0.22}$	0,30 × Kapasitas pengolahan (MGD) $^{-0.22}$

Sumber: Plumlee *et al.* (2014)

Berdasarkan persamaan pada Tabel 4.6 dapat dihitung biaya investasi dan operasional serta maintenance untuk teknologi membran dan ozonasi serta filtrasi karbon aktif. Perhitungan dilakukan untuk instalasi berkapasitas 1-10 MGD. Berdasarkan perhitungan dapat dilihat bahwa biaya investasi untuk teknologi membran lebih tinggi dibandingkan teknologi ozonasi terintegrasi dengan filtrasi karbon aktif dengan EBCT 10 menit. Namun apabila dibandingkan dengan teknologi ozonasi terintegrasi dengan filtrasi karbon aktif dengan EBCT 20 menit, biaya investasi teknologi membran lebih terjangkau.

Tabel 4. 7 Perbandingan Biaya Investasi

Biaya Investasi ($M)			
Kapasitas (MGD)	Membran Mikrofiltrasi/ Ultrafiltrasi	Ozonasi + Filtrasi Karbon Aktif (EBCT 10 menit)	Ozonasi + Filtrasi Karbon Aktif (EBCT 20 menit)
1	3,570	5,180	3,905
3	2,804	2,898	3,096
5	2,506	2,212	2,897
10	2,151	1,534	2,750

Menurut Plumlee *et al.* (2014) biaya operasional dan pemeliharaan (*maintenance*) meliputi perkiraan penggunaan energi, biaya suku cadang pengganti, penggunaan bahan kimia, dan ukuran sistem pengolahan. Untuk pengolahan dengan ozon bergantung pada perkiraan dosis, dosis yang digunakan untuk pada persamaan Tabel 4.7 disesuaikan dengan dosis ozon tipikal di wilayah perencanaan yaitu 3 mg/L. Pada filter karbon aktif dipengaruhi lamanya waktu kontak EBCT (*empty bed contact time*) instalasi yang telah dibangun sebelumnya. Perhitungan perbandingan biaya O&M untuk kedua teknologi dapat dilihat pada Tabel 4.8. Berdasarkan perhitungan dapat disimpulkan bahwa biaya O&M untuk kedua teknologi bergantung pada kapasitas pengolahan yang diinginkan, dimana teknologi membran cenderung memiliki biaya terjangkau untuk kapasitas 1-3 MGD.

Tabel 4. 8 Perbandingan Biaya Operasional & Maintenance

Biaya Operasional & Maintenance ($M)			
Kapasitas (MGD)	Membran Mikrofiltrasi /Ultrafiltrasi	Ozonasi + Filtrasi Karbon Aktif (EBCT 10 menit)	Ozonasi + Filtrasi Karbon Aktif (EBCT 20 menit)
1	0,300	0,081	0,076
3	0,236	0,066	0,079
5	0,211	0,061	0,080
10	0,181	0,054	0,081

Perbandingan teknologi membran terintegrasi dengan filtrasi terangkum dalam Tabel 4.9. Teknologi membran lebih unggul dibandingkan dengan teknologi ozonasi terintegrasi dengan filtrasi dalam hal sefisiensi penyisihan, selektivitas, kemudahan operasional dan *maintenanc*e serta efisiensi ruang.

Tabel 4. 9 Perbandingan Teknologi Membran Mikrofiltrasi/Ultrafiltrasi dan Teknologi Ozonasi Terintegrasi dengan Filtrasi

No	Aspek	Mikrofiltrasi/Ultrafiltrasi	Ozonasi + Filtrasi Media Berbutir	Keterangan
1	Efisiensi penyisihan mikroplastik	91-100 %	• 17,22-22,2 % (meningkatkan effisiensi) • 18 ± 46% (efisiensi Unit)	Teknologi membran memiliki efisiensi penyisihan lebih tinggi
2	Mekanisme penyisihan mikroplastik	• Partikel mikroplastik tersaring dan tertahan pada permukaan pori membran • Teknologi membran, menyisihkan mikroplastik dengan ukuran lebih kecil (bergantung pada ukuran pori membran)	• Terjadi melalui proses penyaringan dan adsorpsi pada media berbutir. • Filtrasi media berbutir, menyisihkan mikroplastik dengan ukuran >200 µm	Selektivitas membran lebih baik dibandingkan teknologi penyaringan dengan filter media berbutir
3	Kemudahan *Maintenance*	Terjadinya *fouling* pada membran, frekuensi *backwash* lebih sering (setiap 30-60 menit) untuk menghindari fouling secara optimal.	Frekuensi *backwash* lebih sedikit dibandingkan membran	Frekuensi bergantung pada sistem operasi, jenis membran dan air baku.
4	Kemudahan Operasional	Relatif lebih mudah, karena dioperasikan secara otomatis	Dapat dioperasikan secara otomatis maupun manual namun memerlukan pemantauan lebih pada proses ozonasi	Teknologi membran lebih mudah dioperasikan dibanding ozonasi+filtrasi.

No	Aspek	Mikrofiltrasi/Ultrafiltrasi	Ozonasi + Filtrasi Media Berbutir	Keterangan
6	Kemungkinan Fragmentasi mikroplastik	Terjadi akibat tekanan, gaya geser, frekuensi *backwash* dan penggunaan bahan kimia pembersih pori membran	• Ozonasi: terjadi reaksi kimia pada rantai ikatan polimer mikroplastik yang menyebabkan terjadinya degradasi dan fragmentasi. • Filtrasi: Terjadi akibat adanya *biofilm* yang terbentuk dalam media filter dan gesekan antara media berbutir dan partikel mikroplastik.	• Pada proses ozonasi terjadi penambahan kelimpahan mikroplastik, yang dapat diturunkan dengan proses filtrasi. • Ozonasi dapat dikombinasikan dengan membran filter sebagai pre-treatment untuk mengurangi fouling.
7	Residu	Residu berasal dari *backwash* harian dan pencucian pori setempat (setiap 3-4 bulan)	Residu berasal dari pencucian media, pergantian media dan proses *backwash*	Penanganan residu membran lebih sedikit namun lebih sering, residu teknologi ozonasi+filtrasi lebih banyak namun untuk jangka waktu lebih panjang
8	Interaksi dengan polutan lain	Proses penyaringan berlangsung secara fisik, interaksi dengan polutan lain beresiko mengakibatkan penyumbatan secara fisik pada permukaan pori membran	Ozon dapat bereaksi dengan polutan lain yang dapat mempercepat atau menghambat reaksi ozon dengan polimer mikroplastik	Teknologi membran memiliki interaksi dan dampak yang lebih sedikit terhadap keberadaan polutan selain mikroplastik

No	Aspek	Mikrofiltrasi/Ultrafiltrasi	Ozonasi + Filtrasi Media Berbutir	Keterangan
9	Proses dan Instalasi	Sistem kerja sederhana dan memerlukan ruang yang lebih sedikit	Proses pengolahan melibatkan reaksi kimia yang cukup kompleks pada tahap ozonasi dan memerlukan ruang yang lebih luas karena terdiri atas beberapa unit (ozon generator, bak kontak ozon dan bak filtrasi)	Teknologi membran memiliki efisiensi ruang yang lebih baik dibandingkan teknologi ozonasi+filtrasi
9	Biaya investasi	Biaya investasi teknologi membran lebih terjangkau	Biaya investasi lebih tinggi dibandingan teknologi membran (untuk EBCT 20 menit)	• Untuk ozonasi bergantung pada dosis ozon yang dibubuhkan • Untuk filtrasi, bergantung pada media filter yang digunakan dan EBCT • untuk kapasitas air produksi 1-3 MGD
10	Biaya O&M	Biaya investasi O&M lebih rendah dibandingkan teknologi ozonasi+ filtrasi karbon aktif dengan EBCT 20 menit	Biaya investasi O&M lebih rendah dibandingkan teknologi membran (untuk teknologi ozonasi+filtrasi karbon aktif EBCT 10 menit)	Perbandingan biaya O&M: teknologi ozonasi+filtrasi karbon aktif EBCT 20 menit > teknologi membran > teknologi ozonasi+ filtrasi karbon aktif EBCT 10 menit

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil kajian literatur terkait perbandingan mekanisme penyisihan mikroplastik pada pengolahan air minum dengan teknologi membran dan ozonasi terintegrasi dengan filtrasi dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Kelimpahan mikroplastik pada air baku sebesar 17-7000 partikel/L dan pada air minum mencapai 2-1401 partikel/L. Jenis polimer penyusun mikroplastik pada air minum didominasi oleh PET, PE, PP*, polyester*, selulosa asetat, dan LDPE sedangkan bentuk mikroplastik yang paling sering ditemukan di air minum yaitu *fiber* dan fragmen. Pembagian *range* ukuran mikroplastik di air minum sangat bervariasi 1 µm – 5 mm. Sedangkan, penelitian mengenai warna mikroplastik di air minum sangat jarang dilakukan.
2. Pada teknologi membran ultrafiltrasi dan mikrofiltrasi mekanisme proses penyisihan mikroplastik terjadi melalui proses penyaringan akibat perbedaan ukuran antara partikel mikroplastik dengan ukuran pori membran. Sementara, pada teknologi ozonasi tidak terjadi penyisihan mikroplastik melainkan mikroplastik berubah menjadi bentuk yang lebih kecil yang dipisahkan dengan mekanisme penyaringan dan adsorpsi pada tahap filtrasi.
3. Teknologi membran lebih unggul dalam menyisihkan mikroplastik dibandingkan dengan teknologi ozonasi terintegrasi dengan filtrasi terutama pada aspek: efisiensi penyisihan sebesar 91-100%, selektivitas, biaya, kemudahan operasional dan *maintenance* serta efisiensi ruang.

5.2. Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk studi terkait perbandingan mekanisme penyisihan mikroplastik pada pengolahan air minum dengan teknologi membran dan ozonasi terintegrasi dengan filtrasi meliputi:

1. Diperlukan penelitian lebih lanjut tentang karakteristik warna mikroplastik di air minum untuk mempermudah penelusuran kemungkinan sumber pencemar mikroplastik.
2. Diperlukan penelitian lebih lanjut tentang dosis koagulan yang tepat untuk mengurangi *fouling* pada membran.
3. Diperlukan penelitian skala lapangan mengenai kelimpahan dan karakteristik mikroplastik di IPAM yang telah menerapkan teknologi mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi.
4. Diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai performa kombinasi teknologi membran dengan ozonasi dalam menyisihkan mikroplastik

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

Adib, D., Mafigholami, R. and Tabeshkia, H., 2021. “Identification of Microplastics in Conventional Drinking Water Treatment Plants in Tehran, Iran”.

Ahmed, M. B., Rahman, M. S., Alom, J., Hasan, M. S., Johir, M. A. H., Mondal, M. I. H. & Yoon, M. H. 2021. “Microplastic particles in the aquatic environment: A systematic review”. Science of the Total Environment, 145793.

Anonymous. 2019. “An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data”. Association of Plastic Manufacturers, Brussels. Belgium.

Akarsu, C., Kumbur, H., Gökdağ, K., Kıdeyş, A. E., & Sanchez-Vidal, A. 2020. “Microplastics Composition and Load from Three Wastewater Treatment Plants Discharging into Mersin Bay, northeastern, Mediterranean Sea”. Marine Pollution Bulletin, 150, 110776.

Baker, R. W., 2012. Membrane Technology and Applications. California: John Wiley & Sons, Inc.

Baresel, C., Harding, M., & Fång, J. 2019. “Ultrafiltration/Granulated Active Carbon-Biofilter: Efficient Removal of a Broad Range of Micropollutants”. Applied Sciences, 9(4), 710.

Belfort, G., Davis, R. H., & Zydney, A. L. 1994. “The Behavior of Suspensions and Macromolecular Solutions in Crossflow Microfiltration”. Journal of Membrane Science, 96(1-2), 1-58.

Boyle, K. and Örmeci, B., 2020. “Microplastics and Nanoplastics in the Freshwater and Terrestrial Environment: A Review”. Water, 12(9), p.2633.

Browne, M.A., Crump, P., Niven, S.J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T. and Thompson, R., 2011. Accumulation of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks. Environmental Science & Technology, 45(21), pp.9175-9179.

Bui, X.T., Nguyen, P.T., Nguyen, V.T., Dao, T.S. and Nguyen, P.D., 2020. “Microplastics Pollution in Wastewater: Characteristics, Occurrence and Removal Technologies”. Environmental Technology & Innovation 19, 2352-1864

Cai, Y., Mitrano, D. M., Heuberger, M., Hufenus, R., & Nowack, B. 2020. “The Origin of Microplastic *Fiber* in Polyester Textiles: The Textile Production Process Matters”. Journal of Cleaner.

Cai, H., Chen, M., Chen, Q., Du, F., Liu, J., & Shi, H. 2020. “Microplastic Quantification Affected by Structure and Pore Size of Filters”. Chemosphere, 257, 127198.Production, 267, 121970.

Cheng, Y. L., Kim, J. G., Kim, H. Bin, Choi, J. H., Fai Tsang, Y., & Baek, K. 2021. “Occurrence and Removal of Microplastics in Wastewater Treatment Plants and Drinking Water Purification Facilities: A Review”. Chemical Engineering Journal, 410, 128381.

Cheryan, M. 1998. “Ultrafiltration and Microfiltration Handbook”. CRC press. Page 1-20

Cheung, P. K., & Fok, L. 2017. “Characterisation of Plastic Microbeads in Facial Scrubs and Their Estimated Emissions in Mainland China”. Water Research, 122, 53–61.

Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C. and Galloway, T.S., 2011. “Microplastics as Contaminants in the Marine Environment: A Review”. Marine Pollution Bulletin, 62,12:.2588-2597.

Crawford, C. B and Quinn, B. 2017. “Microplastic Pollutants” Elsevier Inc.

Cuartucci, M. 2020. “Ultrafiltration, a Cost-Effective Solution for Treating Surface Water to Potable Standard”. Water Practice & Technology, 15(2), 426-436.

Dalmau-Soler, J., Ballesteros-Cano, R., Boleda, M. R., Paraira, M., Ferrer, N., & Lacorte, S. 2021. “Microplastics from Headwaters to Tap Water: Occurrence and Removal in A Drinking Water Treatment Plant in Barcelona Metropolitan Area (Catalonia, NE Spain)”. Environmental Science and Pollution Research, 1-11.

Ding, H., Zhang, J., He, H., Zhu, Y., Dionysiou, D. D., Liu, Z., & Zhao, C. 2021. “Do Membrane Filtration Systems in Drinking Water Treatment Plants Release Nano/Microplastics?”. Science of the Total Environment, 755, 142658.

Firdaus, M., Trihadiningrum, Y., & Lestari, P. 2020.” Microplastic Pollution in the Sediment of Jagir Estuary, Surabaya City, Indonesia”. Marine Pollution Bulletin, 150,110790.

Guo, X., Zhang, Z., Fang, L., & Su, L. 2009. “Study on Ultrafiltration for Surface Water by A Polyvinylchloride Hollow Fiber Membrane”. Desalination, 238(1-3), 183-191.

Eerkes-Medrano, D., Thompson, R. C., & Aldridge, D. C. 2015. “Microplastics in Freshwater Systems: A Review of The Emerging Threats, Identification of Knowledge Gaps and Prioritisation of Research Needs”. Water Research, 75, 63–82.

Enfrin, M., Dumée, L. F., & Lee, J. 2019. “Nano/Microplastics in Water and Wastewater Treatment Processes – Origin, Impact and Potential Solutions”. Water Research, 161, 621–638.

Enfrin, M., Lee, J., Le-Clech, P., & Dumée, L. F. 2020. “Kinetic and Mechanistic Aspects of Ultrafiltration Membrane Fouling by Nano-And Microplastics”. Journal of Membrane Science, 601, 117890.

Erianik D, Marsono BD, Soedjono ES. 2020. “Evaluation of Zona Air Minum Prima (ZAMP) Program in Ngagel Tirto Surabaya”. InIOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 506, 1

Gao, W., Liang, H., Ma, J., Han, M., Chen, Z. lin, Han, Z. shuang, & Li, G. bai. 2011. “Membrane Fouling Control in Ultrafiltration Technology for Drinking Water Production: A Review”. Desalination, 272(1–3), 1–8.

Gibert, O., Lefèvre, B., Fernández, M., Bernat, X., Paraira, M., Calderer, M., & Martínez-Lladó, X. 2013. “Characterising Biofilm Development on Granular Activated Carbon Used for Drinking Water Production”. Water Research, 47(3), 1101–1110.

Godoy, V., Blázquez, G., Calero, M., Quesada, L., & Martín-Lara, M. A. 2019. “The Potential of Microplastics as Carriers of Metals”. Environmental Pollution, 255.

Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., & Thiel, M. 2012. “Microplastics in the Marine Environment: A Review of The Methods Used for Identification and Quantification”. Environmental Science and Technology, 46(6), 3060–3075.

Hidayaturrahman, H., & Lee, T. G. 2019. “A Study on Characteristics of Microplastic in Wastewater of South Korea: Identification, Quantification, and Fate of Microplastics During Treatment Process. Marine Pollution Bulletin, 146, 696-702.

Horton, A. A., Walton, A., Spurgeon, D. J., Lahive, E., & Svendsen, C. 2017. “Microplastics in Freshwater and Terrestrial Environments: Evaluating the Current Understanding to Identify the Knowledge Gaps and Future Research Priorities”. Science of the Total Environment, 586, 127–141.

Hosoda, J., Ofosu-Anim, J., Sabi, E. B., Akita, L.G., Onwona-Agyeman, S., Yamashita, R., & Takada, H. 2014. “Monitoring of Organic Micropollutants in Ghana by Combination of Pellet Watch with Sediment Analysis: E-Waste as A Source of Pcbs”. Marine Pollution Bulletin 86,1-2: 575-581.

Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A & Law, K. L. 2015. “Plastic Waste Inputs from Land into the Ocean”.Science,347: 768-771.

Kankanige, D., & Babel, S. 2021. “Contamination by≥ 6.5 µm-sized microplastics and their removability in a conventional water treatment plant (WTP) in Thailand”. Journal of Water Process Engineering, 40, 101765.

Käppler, A., Fischer, D., Oberbeckmann, S., Schernewski, G., Labrenz, M., Eichhorn, K. J., & Voit, B. 2016. “Analysis of Environmental Microplastics by Vibrational Microspectroscopy: FTIR, Raman or Both?”. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 408(29), 8377–8391.

Karuniastuti, N. 2013. Bahaya Plastik terhadap Kesehatan dan Lingkungan. Swara Patra, 3(1).

Koelmans, A. A., Mohamed Nor, N. H., Hermsen, E., Kooi, M., Mintenig, S. M., & De France, J. 2019. “Microplastics in Freshwaters and Drinking Water: Critical Review and Assessment of Data Quality”. Water Research, 155, 410–422.

Krisnawati, A., Sururi, M. R., & Ainun, S. 2014. “Pengaruh Karakteristik Lindi terhadap Ozonisasi Konvensional dan Advanced Oxidation Processes (AOP)”. Jurnal Online Institute Teknologi Nasional, 2(Rekayasa Lingkungan), 1–9.

Law, R. C. 2004. “Cellulose acetate in textile application”. Macromolecular Symposia, 208, 255–266.

Lee, H., & Tan, T. P. 2016. “Singapore’s experience with reclaimed water: NEWater”. International Journal of Water Resources Development, 32(4), 611-621.

Lestari, P., & Trihadiningrum Y. 2019. “The impact of improper solid waste management to plastic pollution in Indonesian coast and marine environment”. Marine Pollution Bulletin 1, 149:110505.

Lestari, P., Trihadiningrum, Y., Wijaya B.A., Yunus K.A., & Firdaus M. 2020. “Distribution of microplastics in Surabaya River, Indonesia”. Science of The Total Environment 8:138560.

Li, J., Liu, H., & Chen J.P. 2018. “Microplastics in Freshwater Systems: A Review on Occurrence, Environmental Effects, and Methods for Microplastics Detection”. Water Research 15,137:362-74.

Lippiatt, S., Opfer, S. & Arthur, C., 2013. Marine Debris Monitoring and Assessment: Recommendations for Monitoring Debris Trends in the Marine Environment.

Lobelle, D., & Cunliffe, M. 2011. “Early microbial biofilm formation on marine plastic debris”. Marine pollution bulletin, 62(1), 197-200.

Lubello, C., Gori, R., De Bernardinis, A. M., & Simonelli, G. 2003. “Ultrafiltration as Tertiary Treatment for Industrial Reuse”. Water Science and Technology: Water Supply, 3(4), 161–168.

Lusher, A. L., Bråte, I. L. N., Munno, K., Hurley, R. R., & Welden, N. A. 2020. “Is It or Isn't It: The Importance of Visual Classification in Microplastic Characterization”. Applied spectroscopy, 74(9), 1139-1153.

Löder, M. G., & Gerdts, G. 2015. “Methodology Used for the Detection and Identification of Microplastics—A Critical Appraisal”. Marine Anthropogenic Litter, 201-227.

Ma, B., Xue, W., Hu, C., Liu, H., Qu, J., Li, L. 2019. “Characteristics of Microplastic Removal Via Coagulation and Ultrafiltration During Drinking Water Treatment”. Chemical Engineering Journal 1;359: 159-67.

Madhura, L., Kanchi, S., Sabela, M. I., Singh, S., & Bisetty, K. 2018. “Membrane technology for water purification”. Environmental Chemistry Letters, 16(2), 343-365.

Malmrose, P., Lozier, J., Marie, J., Mickley, M., Reiss, R., Russell, J., Schaefer, J., Sethi, S., Worley, J. 2003. “Committee Report: Residuals Management for Low-Pressure Membranes,”. Residual Management Research Committee Subcommittee

on Membrane Residual Management. Jour. AWWA, 95:6:68. AWWA, June 2003. DCN DW00003.

Mar'atusholihah, M., Trihadiningrum, Y., & Radityaningrum, A. D. 2021. "Kelimpahan dan Karakteristik Mikroplastik pada IPAM Karangpilang III Kota Surabaya". Jurnal Teknik ITS, 9(2), C154-C160.

Masduqi, A & Assomadi, A.F. 2012. "Operasi dan Proses Pengolahan Air". Surabaya: ITS Press.

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". Scientific Reports 3;8(1):1-2.

Mintenig, S. M., Löder, M. G. J., Primpke, S., & Gerdts, G. 2019." Low numbers of microplastics detected in drinking water from ground water sources". Science of the total environment, 648, 631-635.

Mizukawa, K., Takada, H., Ito, M., Geok, Y.B., Hosoda, J., Yamashita, R., Saha, M., Suzuki, S., Miguez, C., Frias, J., & Antunes, JC. 2013. "Monitoring of A Wide Range of Organic Micropollutants on the Portuguese Coast using Plastic Resin Pellets". Marine Pollution Bulletin, 70(1-2):296-302.

Mulder, M. 1996. "Basic Principles of Membrane Technology". Netherlands. Akluwer Academic Publishers. Page 1-8.

Napper, I. E., Bakir, A., Rowland, S. J., & Thompson, R. C. 2015. "Characterisation, Quantity and Sorptive Properties of Microplastics Extracted from Cosmetics". Marine Pollution Bulletin, 99(1–2), 178–185.

Novotna, K., Cermakova, L., Pivokonska, L., Cajthaml, T., & Pivokonský, M. 2019. "Microplastics in Drinking Water Treatment–Current Knowledge and Research Needs". Science of the Total Environment 1, 667:730-40.

Oßmann, B.E., Sarau, G., Holtmannspötter, H., Pischetsrieder, M., Christiansen, S.H., & Dicke W. 2018. "Small-Sized Microplastics and Pigmented Particles in Bottled Mineral Water". Water Research 15;141:307-16.

Padervand, M., Lichtfouse, E., Robert, D., & Wang, C. 2020. "Removal of Microplastics from the Environment. A Review". Environmental Chemistry Letters, 18(3), 807–828.

Peng, G., Zhu, B., Yang, D., Su, L., Shi, H., & Li, D. 2017. “Microplastics in sediments of the Changjiang Estuary, China”. Environmental Pollution, 225, 283-290.

Poerio, T., Piacentini, E., & Mazzei, R. 2019. Membrane Processes for Microplastic Removal. Molecules, 24(22), 4148.

Pizzichetti, A. R. P., Pablos, C., Álvarez-Fernández, C., Reynolds, K., Stanley, S., & Marugán, J. 2021. Evaluation of Membranes Performance for Microplastic Removal in A Simple and Low-Cost Filtration System. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 3, 100075.

Pivokonský, M., Cermakova, L., Novotna, K., Peer, P., Cajthaml, T., Janda, V. 2018. “Occurrence of Microplastics in Raw and Treated Drinking Water”. Science of the Total Environment”. Dec 1;643:1644-51

Pivokonský, M., Pivokonská, L., Novotná, K., Čermáková, L., & Klimtová, M. 2020. “Occurrence and fate of microplastics at two different drinking water treatment plants within a river catchment”. Science of the Total Environment, 741, 140236.

Plumlee, M. H., Stanford, B. D., Debroux, J. F., Hopkins, D. C., & Snyder, S. A. 2014. “Costs of advanced treatment in water reclamation”. Ozone: Science & Engineering, 36(5), 485-495.

Pramanik, B. K., Pramanik, S. K., & Monira, S. 2021. “Understanding the Fragmentation of Microplastics into Nano-Plastics and Removal of Nano/Microplastics from Wastewater Using Membrane, Air Flotation and Nano-Ferrofluid Processes”. Chemosphere, 131053.

Prata, J.C., da Costa, J.P., Lopes, I., Duarte, A.C. and Rocha-Santos, T., 2020. “Environmental Exposure to Microplastics: An Overview on Possible Human Health Effects”. Science of the Total Environment 702,134455.

Puls, J., Wilson, S. A., & Hölter, D. 2011. “Degradation of Cellulose Acetate-Based Materials: A Review”. Journal of Polymers and the Environment, 19(1), 152–165.

Robinson, S., Abdullah, S. Z., Bérubé, P., & Le-Clech, P. 2016. “Ageing of Membranes for Water Treatment: Linking Changes to Performance”. Journal of Membrane Science, 503, 177–187.

Rodríguez, A., Rosal, R., Perdigón-Melón, J. A., Mezcua, M., Agüera, A., Hernando, M. D., Letón, P., Fernández-Alba, A. R., &

García-Calvo, E. 2008. “Ozone-Based Technologies in Water and Wastewater Treatment”. Handbook Of Environmental Chemistry, Volume 5: Water Pollution, 5 S2(February), 127–175.

Ross, P. S., van der Aa, L. T. J., van Dijk, T., & Rietveld, L. C. 2019. “Effects of Water Quality Changes on Performance of Biological Activated Carbon (BAC) Filtration”. Separation and Purification Technology, 212, 676–683.

Rummel, C. D., Jahnke, A., Gorokhova, E., Kühnel, D., & Schmitt-Jansen, M. 2017. “Impacts of Biofilm Formation on the Fate and Potential Effects of Microplastic in the Aquatic Environment”. Environmental Science and Technology Letters, 4(7), 258–267.

Ryan, P. G., Moore, C. J., van Franeker, J. A., & Moloney, C. L. 2009. “Monitoring the Abundance of Plastic Debris in the Marine Environment”. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 364

Sarkar, D. J., Sarkar, S. D., Das, B. K., Praharaj, J. K., Mahajan, D. K., Purokait, B., & Samanta, S. 2021. “Microplastics Removal Efficiency of Drinking Water Treatment Plant with Pulse Clarifier”. Journal of Hazardous Materials, 413, 125347.

Sembiring, E., Fajar, M., & Handajani, M. 2021. “Performance of Rapid Sand Filter – Single Media to Remove Microplastics”. Water Supply, 1–12.

Shalahuddin, I., & Wibisono, Y. 2019. “Mekanisme Fouling pada Membran Mikrofiltrasi Mode Aliran Searah dan Silang”. Jurnal Rekayasa Proses, 13(1), 6-15.

Shim, W. J., Hong, S. H., & Eo, S. E. 2017. “Identification Methods in Microplastic Analysis: A Review”. Analytical Methods, 9(9), 1384–1391.

Shirazi, S., & Lin, C. J. 2016. “Membrane Technology for Water Purification and Desalination”. Sustainable Water Technologies, 2, 269–295.

Shen, M., Song, B., Zhu, Y., Zeng, G., Zhang, Y., Yang, Y., ... & Yi, H. 2020. Removal of Microplastics Via Drinking Water Treatment: Current Knowledge and Future Directions. Chemosphere, 251, 126612.

Song, Y. K., Hong, S. H., Jang, M., Han, G. M., Rani, M., Lee, J., & Shim, W. J. 2015. “A Comparison of Microscopic and

Spectroscopic Identification Methods for Analysis of Microplastics in Environmental Samples". Marine Pollution Bulletin, 93(1–2), 202–209.

Sol, D., Laca, A., Laca, A., & Diaz, M. 2020. "Approaching the Environmental Problem of Microplastics: Importance of WWTP Treatments". Science of the Total Environment, 740, 140016.

Sun, J., Dai, X., Wang, Q., Van Loosdrecht, M. C., & Ni, B. J. 2019. "Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal". Water research, 152, 21-37.

Talvitie, J., Mikola, A., Koistinen, A., & Setälä, O. 2017. "Solutions to microplastic pollution – Removal of Microplastics from Wastewater Effluent with Advanced Wastewater Treatment Technologies". Water Research, 123, 401–407.

Thompson, R.C. 2015. "Microplastics in the Marine Environment: Sources, Consequences and Solutions". Marine Anthropogenic Litter, Pp. 185-200. Springer, Cham,

USEPA. (2011). Drinking Water Treatment Plant Residuals Management Technical Report.

Von Gunten, U. 2007. "The Basics of Oxidants in Water Treatment. Part B: Ozone Reactions". Water Science and Technology, 55(12), 25–29.

Wang, W., Ndungu, A. W., Li, Z., & Wang, J. 2017. "Microplastics pollution in inland freshwaters of China: a case study in urban surface waters of Wuhan, China". Science of the Total Environment, 575, 1369-1374.

Wang, Z., Lin, T., & Chen, W. 2020."Occurrence and Removal of Microplastics in an Advanced Drinking Water Treatment plant (ADWTP)". Science of the Total Environment, 700, 134520.

Wei, C., Zhang, F., Hu, Y., Feng, C., & Wu, H. 2017. "Ozonation in Water Treatment: The Generation, Basic Properties of Ozone and Its Practical Application". Reviews in Chemical Engineering, 33(1), 49–89.

Wenten, I. G. 2016. "Teknologi membran: Prospek dan tantangannya di Indonesia". Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung, 26.

Wibowo, Y. G., Maryani, A. T., Rosanti, D., & Rosarina, D. 2019. "Microplastic in Marine Environment and Its Impact".

Sainmatika: Jurnal Ilmiah Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, 16(1), 81-87.

Winkler, A., Santo, N., Ortenzi, M. A., Bolzoni, E., Bacchetta, R., & Tremolada, P. 2019. “Does mechanical stress cause microplastic release from plastic water bottles?”. Water research, 166, 115082.

Yahyanezhad, N., Bardi, M. J., & Aminirad, H. 2021. “An Evaluation of Microplastics Fate in the Wastewater Treatment Plants: Frequency and Removal of Microplastics by Microfiltration Membrane”. Water Practice and Technology, 00(0), 1–11.

Yang, J., Monnot, M., Eljaddi, T., Ercolei, L., Simonian, L., & Moulin, P. 2021. “Ultrafiltration as Tertiary Treatment for Municipal Wastewater Reuse”. Separation and Purification Technology, 272, 118921.

Yamamura, H., Kimura, K., & Watanabe, Y. 2007. “Mechanism Involved in the Evolution of Physically Irreversible Fouling in Microfiltration and Ultrafiltration Membranes Used for Drinking Water Treatment”. Environmental Science and Technology, 41(19), 6789–6794.

Yaranal, N. A., Subbiah, S., & Mohanty, K. 2021. “Identification, extraction of microplastics from edible salts and its removal from contaminated seawater”. Environmental Technology & Innovation, 21, 101253.

Zarfl, C. 2019. “Promising techniques and open challenges for microplastic identification and quantification in environmental matrices”.Analytical and bioanalytical chemistry,411(17), 3743-3756.

Zhang, X., Guo, J., Wang, L., Hu, J., & Zhu, J. 2013. “In Situ Ozonation to Control Ceramic Membrane Fouling in Drinking Water Treatment”. Desalination, 328, 1–7.

Zhang, K., Gong, W., Lv, J., Xiong, X., & Wu, C. 2015. “Accumulation of Floating Microplastics Behind the Three Gorges Dam”. Environmental Pollution, 204, 117–123.

Zhang, Y., Diehl, A., Lewandowski, A., Gopalakrishnan, K., & Baker, T. 2020. “Removal Efficiency of Micro-and Nanoplastics (180 nm–125 μm) During Drinking Water Treatment”. Science of The Total Environment, 720, 137383.

Zhang, Z., Su, Y., Zhu, J., Shi, J., Huang, H., & Xie, B. 2021. “Distribution and removal characteristics of microplastics in

different processes of the leachate treatment system". Waste Management, 120, 240-247.

Zhao, Z., Zheng, J., Peng, B., Li, Z., Zhang, H., & Han, C. C. 2013. "A novel composite microfiltration membrane: Structure and performance". Journal of membrane science, 439, 12-19.

Zheng, J., Lin, T., Chen, W., Tao, H., Tan, Y., & Ma, B. 2018. "Removal of Precursors of Typical Nitrogenous Disinfection Byproducts in Ozonation Integrated with Biological Activated Carbon (O3/BAC)". Chemosphere, 209, 68–77.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIOGRAFI PENULIS

BIOGRAFI PENULIS

Penulis memiliki nama lengkap Dewi Puji Rahayu. Penulis lahir di Surabaya pada tanggal 27 Juli 1997. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Negeri Gubeng II Surabaya, SMP Negeri 6 Surabaya dan SMK Negeri 5 Surabaya dengan Jurusan Kimia Industri. Pada tahun 2017 penulis melanjutkan studi sarjananya di Departemen Teknik Lingkungan FTSPK Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan NRP 03211740000027. Selama perkuliahan penulis mengikuti kegiatan dalam Organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL) dan pernah menjadi kepala Biro Internal di Komunitas Kelompok Pecinta dan Pemerhati Lingkungan (KPPL). Penulis pernah menjadi asisten laboratorium untuk mata kuliah Teknologi Remediasi Lingkungan. Berbagai pelatihan, kegiatan kepanitiaan baik dalam atau luar departemen diikuti dalam rangka pengembangan diri. Penulis juga mencoba mengajukan proposal PKM walaupun belum terdanai. Penulis juga pernah berpartisipasi sebagai finalis lomba Desain IPAL Domestik yang diadakan Kementrian Hidup dan Perhutanan. Apabila ada kritik dan saran mengenai tugas akhir dari penulis, dapat menghubungi via email dewi.puji.r@gmail.com.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL PERENCANAAN DAN KEBUMIAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

FORM FTA-03

KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : Dewi Puji Rahayu
NRP : 03211740000027
Judul : Kajian Literatur Perbandingan Mekanisme Penyisihan Mikroplastik pada Pengolahan Air Minum menggunakan Teknologi Membran dan Ozonasi terintegrasi dengan filtrasi

No	Tanggal	Keterangan Kegiatan / Pembahasan	Paraf
1	02/02/2021	Asistensi terkait keseluruhan proposal tugas akhir sebelum seminar proposal.	
2	03/03/2021	Asistensi terkait revisi proposal setelah seminar tugas akhir terkait: - Perbaikan penulisan - Perbaikan judul studi - Perubahan tujuan pertama terkait karakteristik mikroplastik - Perbaikan latar belakang - Penambahan ruang lingkup - Perbaikan metode studi	
3	13/03/2021	Asistensi terkait revisi proposal tugas akhir terkait: - Perbaikan latar belakang - Penambahan ruang lingkup - Detail metode dan data studi literatur	
4	15/04/2021	Asistensi BAB IV terkait: - Perbaikan penulisan - Perbaikan Isi dan pembahasan mengenai karakteristik mikroplastik dalam IPAM, identifikasi polimer dan kemungkinan sumber pencemaran mikroplastik - Penyusunan data yang digunakan	
5	16/05/2021	Asistensi BAB IV terkait: - Perbaikan penulisan, isi dan pembahasan mengenai mekanisme penyisihan mikroplastik menggunakan teknologi membran dan ozonasi terintegrasi dengan filtrasi, kemampuan kedua teknologi dalam menyisihkan mikroplastik.	
6	25/05/2021	- Asistensi BAB I: perbaikan penulisan, perbaikan latar belakang, ruang lingkup, dan abstrak - Asistensi BAB IV: perbaikan penulisan, perbandingan kelemahan dan keunggulan kedua metode dalam menyisihkan mikroplastik - Asistensi BAB V: perbaikan kesimpulan sementara	
7	27/05/2021	- Asistensi abstrak:terkait: perbaikan tata bahasa dan penulisan - Asistensi BAB IV: perbaikan pembahasan terkait mekanisme dan pendekatan reaksi mikroplastik pada tahap ozonasi, perbaikan tata bahasa penulisan	
8	23/06/2021	Asistensi perbaikan setelah seminar kemajuan tugas akhir : Perbaikan pembahasan - Sistem aliran searah dan silang pada membran - pengolahan pendahuluan sebelum teknologi membran dan teknologi ozonasi terintegrasi dengan filtrasi - Perbandingan aspek teknis dan non teknis pada kedua teknologi Perbaikan kesimpulan poin 3 dan perbaikan tata bahasa penulisan pada BAB IV	

9	27/06/2021	Asistensi terkait perbaikan - Perbaikan penulisan abstrak - Perbaikan kesimpulan	
10	28/07/2021	Asistensi perbaikan laporan setelah ujian lisan - Perbaikan pembahasan perbandingan efisiensi unit ozonasi + filttrasi dengan teknologi membran - Aspek biaya investasi serta O & M pada kedua teknologi - Tata Bahasa dan penulisan	

Surabaya, 29 Juli 2021

Telah Disetujui
Dosen Pembimbing

Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc
NIP. 19530706 198403 2 004

PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIAN - ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

UTA-S1-TL-02 **TUGAS AKHIR** **Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)**
Periode: Genap 2020/2021 **No. Revisi: 01**

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-02
Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Senin, 19 Juli 2021 **Nilai TOEFL 480**
Pukul : 09.30 - 11.00
Lokasi : Zoom Meeting
Judul : Kajian Literatur Perbandingan Mekanisme Penyisihan Mikroplastik pada Pengolahan Air Minum Menggunakan Teknologi Membran dan Ozonasi Terintegrasi dengan Filtrasi

Nama : Dewi Puji Rahayu **Tanda Tangan**
NRP. : 03211740000027
Topik : Studi Literatur

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Ujian Tugas Akhir
	Perbaiki sesuai saran dosen penguji pada saat ujian lisan

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-02 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus dibawa mahasiswa saat asistensi kepada Dosen Pembimbing
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pembimbing

Berdasarkan hasil evaluasi Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing, dinyatakan mahasiswa tersebut:

1. Lulus Ujian Tugas Akhir
2. harus mengulang Ujian Tugas Akhir semester berikutnya
3. Tugas Akhir dinyatakan gagal atau harus mengganti Tugas Akhir (lebih dari 2 semester)

Dosen Pembimbing

Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App. Sc ( )

PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIAN - ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR **Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)**
Periode: Genap 2020/2021 **No. Revisi: 01**

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03B
Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Senin, 19 Juli 2021
Pukul : 09.30 - 11.00
Lokasi : Zoom Meeting
Judul : Kajian Literatur Perbandingan Mekanisme Penyisihan Mikroplastik pada Pengolahan Air Minum Menggunakan Teknologi Membran dan Ozonasi Terintegrasi dengan Filtrasi

Nama : Dewi Puji Rahayu
NRP. : 03211740000027
Topik : Studi Literatur

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
	1. Perbaikan pembahasan terkait kelayakan (biaya investasi dan O&M) 2. Tambahkan penjelasan mengenai efisiensi teknologi ozon pada Tabel 4.9 (meningkatkan efisiensi atau hanya efisiensi per unitnya)

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.
Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji IDAA Warmadewanthi ST., MT., PhD ( )

Dosen Pembimbing Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App. Sc ( )

PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIAN - ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR **Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)**
Periode: Genap 2020/2021 **No. Revisi: 01**

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03C
Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Senin, 19 Juli 2021
Pukul : 09.30 - 11.00
Lokasi : Zoom Meeting
Judul : Kajian Literatur Perbandingan Mekanisme Penyisihan Mikroplastik pada Pengolahan Air Minum Menggunakan Teknologi Membran dan Ozonasi Terintegrasi dengan Filtrasi

Nama : Dewi Puji Rahayu
NRP. : 03211740000027
Topik : Studi Literatur

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
	1. Membran sebagai suatu sistem atau hanya di membrannya saja ? **2. Tabel perbandingan usahakan sajikan % efisiensi dan kelimpahan mikroplastik (partikel/L)** **3. Kesimpulan poin 2 dan 3 usahakan tidak terlalu teoritis (tambahkan % efisiensi)**

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.
Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji Ir. Bowo Djoko Marsono, M.Eng. ( )

Dosen Pembimbing Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App. Sc ( )

“Halaman ini sengaja dikosongkan”