

TUGAS AKHIR - RE184804

**PENGARUH TEKANAN DAN *SPACER* TERHADAP KINERJA
IMMERSED MEMBRANE MIKROFILTRASI**

INAYAH AGUSTINA
NRP. 0321184000092

Dosen Pembimbing
Ir. Bowo Djoko Marsono, M.Eng
NIP. 19650317 199102 1 001

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, Dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022



TUGAS AKHIR - RE184804

**PENGARUH TEKANAN DAN *SPACER* TERHADAP KINERJA
IMMERSED MEMBRANE MIKROFILTRASI**

INAYAH AGUSTINA
NRP. 0321184000092

Dosen Pembimbing
Ir. Bowo Djoko Marsono, M.Eng
NIP. 19650317 199102 1 001

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, Dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022



FINAL PROJECT - RE184804

**PRESSURE AND SPACER EFFECT ON THE
PERFORMANCE OF IMMersed MICROFILTRATION
MEMBRANE**

INAYAH AGUSTINA
NRP. 0321184000092

Advisor
Ir. Bowo Djoko Marsono, M.Eng
NIP. 19650317 199102 1 001

DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
Faculty of Civil, Planning, and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH TEKANAN DAN *SPACER* TERHADAP KINERJA *IMMERSED* *MEMBRANE* MIKROFILTRASI

TUGAS AKHIR

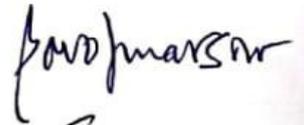
Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **INAYAH AGUSTINA**
NRP. 0321184000092

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

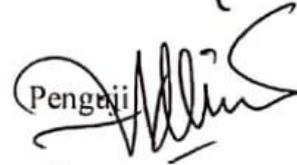
1. Ir. Bowo Djoko Marsono, M. Eng

Pembimbing



2. Adhi Yuniarto, S.T., M.T., Ph.D.

Penguji



3. Dr. Ali Masduqi, S.T., M.T.

Penguji



4. Ainul Firdaun Nisaa, S.T., M.Sc.

Penguji



PERNYATAAN ORISINALITAS

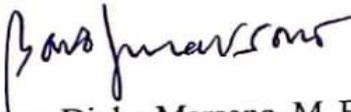
Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Inayah Agustina / 03211840000092
Departemen : Teknik Lingkungan
Dosen Pembimbing / NIP : Ir. Bowo Djoko Marsono, M. Eng / 19650317 199102 1 001

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Pengaruh Tekanan dan *Spacer* Terhadap Kinerja *Immersed Membrane* Mikrofiltrasi” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Mengetahui
Dosen Pembimbing


(Ir. Bowo Djoko Marsono, M. Eng)
NIP. 19650317 199102 1 001

Surabaya, 26 Juli 2022

Mahasiswa,


(Inayah Agustina)
NRP. 03211840000092

PENGARUH TEKANAN DAN SPACER TERHADAP KINERJA *IMMERSED* MEMBRANE MIKROFILTRASI

Nama Mahasiswa/NRP : Inayah Agustina/0321184000092
Departemen : Teknik Lingkungan
Dosen Pembimbing : Ir. Bowo Djoko Marsono, M. Eng

ABSTRAK

Tingkat pencemaran Kali Surabaya yang semakin tinggi menyebabkan penurunan kualitas air. Namun, pengolahan air yang diterapkan pada PDAM Kota Surabaya untuk mengolah Kali Surabaya masih menggunakan proses konvensional dimana proses pengolahan akan semakin berat dengan kualitas air baku yang semakin menurun. Membran mikrofiltrasi terendam merupakan teknologi yang andal dalam pengolahan air dibandingkan teknologi konvensional. Meski demikian, kinerja membran semakin menurun karena adanya deposit yang terjadi di permukaan membran dan menyebabkan terjadinya *fouling*.

Perlu adanya strategi yang efektif untuk mengontrol *fouling* dan mempertahankan kapasitas produksi membran agar dapat meminimalisasi konsumsi energi dan biaya operasional membran. Salah satu alternatif yang dapat dilakukan adalah memberikan tekanan operasi yang optimal dan pemberian sekat (*spacer*) dengan sudut kontak yang optimal untuk mengurangi *fouling*. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh tekanan dan *spacer* terhadap kinerja membran keramik mikrofiltrasi yang diukur berdasarkan parameter kualitas dan kuantitas. Parameter penelitian yang digunakan yaitu nilai kekeruhan, TSS, zat organik, total *coliform*, *E. coli* dan jumlah mikroplastik sedangkan parameter kuantitas meliputi fluks, jumlah produksi air (permeat) dan lama operasi membran. Penelitian ini menguji membran keramik mikrofiltrasi *flat-sheet* terendam pada unit sedimentasi PDAM Ngagel III Kota Surabaya. Operasi membran menggunakan tekanan hisap dan aliran *cross-flow* dengan variabel tekanan (0,6 bar, 0,7 bar, 0,9 bar) serta kemiringan *spacer* (75°, 90°, 105° dan tanpa *spacer*).

Berdasarkan hasil penelitian didapatkan pengaruh tekanan optimal terjadi pada tekanan 0,7 bar dengan efisiensi penyisihan parameter kekeruhan, TSS, zat organik, mikroplastik, total *coliform* dan *E. coli* berturut-turut yaitu 94,66%, 96,88%, 24,29%, 62,27%, 100% dan 100%. Nilai fluks rata-rata yang tercapai pada tekanan 0,7 bar sebesar 64,33 L/m².jam dengan lama operasi 55 jam dan volume produksi permeat 530,70 L. Pengaruh *spacer* optimal tercapai pada kondisi kemiringan 90° dengan efisiensi penyisihan parameter kekeruhan, TSS, zat organik, mikroplastik, total *coliform* dan *E.coli* berturut-turut sebesar 95,12%, 64,58%, 28,75%, 84,74%, 99,99% dan 100%. Rata-rata nilai fluks yang dihasilkan sebesar 66,78 L/m².jam dengan lama operasi 90 jam dan volume produksi permeat 901,55 L.

Kata Kunci: *Cross-flow*, *Fouling*, Mikrofiltrasi, *Spacer*, Tekanan.

Halaman sengaja dikosongkan

PRESSURE AND SPACER EFFECT ON THE PERFORMANCE OF IMMERSSED MICROFILTRATION MEMBRANE

Name of Student/NRP : Inayah Agustina/0321184000092
Study of Programme : Environmental Engineering
Advisor : Ir. Bowo Djoko Marsono, M. Eng

ABSTRACT

The higher level of pollution in Kali Surabaya causes a decrease in water quality. However, the water treatment applied in PDAM Surabaya City to treat Kali Surabaya still uses a conventional process where the treatment process will get even harder with decreasing quality of raw water. Immersed microfiltration membrane is a reliable technology in water treatment compared to conventional technology. Nevertheless, the performance of the membrane decreases due to deposits that occur on the membrane surface and lead to fouling.

An effective strategy is needed to control fouling and maintain membrane production capacity in order to minimize energy consumption and membrane operational costs. One alternative that can be done is to provide optimal operating pressure and provide a *spacer* with an optimal contact angle to reduce fouling. This study aims to examine the effect of pressure and *spacers* on the performance of microfiltration ceramic membrane measured based on quality and quantity parameters. The research parameters used were turbidity, TSS, organic matter, total *coliform*, *E. coli* and the number of microplastic while the quantity parameters included flux, amount of water production (permeate) and the duration of membrane operation before fouling. This study tested submerged flat-sheet microfiltration ceramic membranes in sedimentation unit of PDAM Ngagel III Surabaya City. Membran operation used suction pressure and cross-flow with variable pressure (0.6 bar, 0.7 bar, 0.9 bar) and *spacer* slopes (75°, 90°, 105° and without *spacers*).

Based on the results of the study, it was found that the effect of optimal pressure occurred at 0.7 bar with the efficiency of eliminating turbidity, TSS, organic matter, microplastic, total *coliform*, and *E. coli* parameters respectively, 94,66%, 96,88%, 24,29%, 62,27%, 100% and 100%. The average flux value at pressure 0.7 bar is 64,33 L/m².hour with operating duration of 55 hours and permeate production volume 530,70 L. The optimal *spacer* effect was achieved at slope of 90° with the efficiency of eliminating turbidity, TSS, organic matter, microplastic, total *coliform* and *E. coli* parameters respectively 95,12%, 64,58%, 28,75%, 84,74%, 99,99% and 100%. The average flux value was 66,78 L/m².hour with an operating duration of 90 hours and permeate production volume of 901,55 L.

Keyword(s): Cross-flow, Fouling, Microfiltration, Pressure, *Spacer*.

Halaman sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Segala puji kepada Allah SWT. atas segala rahmat-Nya beserta utusan-Nya, yaitu Rasulullah SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul “Pengaruh Tekanan dan *Spacer* terhadap Kinerja *Immersed Membrane* Mikrofiltrasi” dengan tepat waktu. Penyusunan laporan tugas akhir ini tidak terlepas dari dukungan dan bimbingan dari semua pihak. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas segala kemudahan dan kelancaran yang telah diberikan pada penulis.
2. Bapak Ir. Bowo Djoko Marsono, M. Eng selaku dosen pembimbing yang senantiasa meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, saran dan dukungan dalam penyusunan tugas akhir ini.
3. Bapak Adhi Yuniarto, S.T., M.T., Ph.D, Bapak Dr. Ali Masduqi S.T., M.T., dan Ibu Ainul Firdatun Nisaa, S.T., M.Sc. selaku dosen pengarah yang juga memberikan bimbingan, pengarahan dan masukan dalam penyusunan tugas akhir ini.
4. Kedua orang tua saya, Bapak Herry Widodo dan Ibu Rusminah serta adik yang selalu memberikan dukungan dan kepercayaan kepada penulis.
5. Bapak manajer dan asisten manajer Instalasi Pengolahan Air Minum PDAM Ngagel III dan seluruh Staff Operasi, Staff Maintenance, Staff Keamanan, laboran PDAM Ngagel II serta Pak Mawardi yang telah memberikan kesempatan, bimbingan dan bantuan kepada penulis dalam melaksanakan penelitian tugas akhir ini.
6. Teman-teman seperjuangan khususnya Virginia, Lastri, Suluh, Reinata, Khansa, Aina, Alya dan Yemima serta angkatan 2018 yang telah bersama-sama berjuang saling berbagi dukungan dan semangat kepada penulis untuk dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini.

Penyusunan laporan tugas akhir ini telah diusahakan semaksimal mungkin oleh penulis. Namun, sebagaimana manusia biasa tentunya masih terdapat kekurangan pada penyusunan tulisan ini. Untuk itu penulis berharap adanya kritik dan saran yang bisa disampaikan kepada penulis. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi siapa saja yang membaca tulisan ini di masa yang akan datang.

Surabaya, 26 Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Ruang Lingkup.....	2
1.5 Manfaat	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Unit Sedimentasi IPAM PDAM Ngagel III Surabaya	5
2.2 Karakteristik Membran Mikrofiltrasi	6
2.2.1 Tekanan	6
2.2.2 Ukuran Pori dan Morfologi	6
2.2.3 Material Membran.....	7
2.3 Metode Operasi Membran.....	8
2.4 Parameter Kinerja Membran	9
2.5 Mitigasi <i>Fouling</i> Pada Operasi Membran	10
2.5.1 Tekanan Operasi.....	10
2.5.2 <i>Spacer</i> (sekat).....	11
2.6 Membran Filtrasi Terendam (<i>Immersed</i>)	11
2.7 Pencucian Membran.....	12
2.8 Perbandingan Teknologi Membran dan Filter Konvensional	12
2.9 Penelitian Terdahulu	14
BAB 3 METODOLOGI	17
3.1 Umum.....	17
3.2 Kerangka Penelitian	17
3.3 Ide Penelitian.....	18
3.4 Studi Lapangan dan Literatur	18
3.5 Persiapan Penelitian	20
3.5.1 Persiapan Membran	20
3.5.2 Persiapan Reaktor	21
3.5.3 Persiapan Operasional.....	23
3.6 Pelaksanaan Penelitian	24
3.7 Analisis Sampel.....	25
3.8 Analisis Data dan Pembahasan	26
3.9 Penarikan Kesimpulan dan Saran.....	26
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	27
4.1 Analisis Karakteristik Air Umpan (<i>Feed</i>)	27
4.2 Analisis Pengaruh Tekanan Terhadap Kinerja <i>Immersed Membrane</i> Mikrofiltrasi Pada Unit Sedimentasi IPAM PDAM Ngagel III	29
4.2.1 Analisis Pengaruh Tekanan Terhadap Parameter Kualitas	30
4.2.2 Analisis Pengaruh Tekanan Terhadap Parameter Kuantitas	41
4.3 Analisis Pengaruh <i>Spacer</i> Terhadap Kinerja <i>Immersed Membrane</i> Mikrofiltrasi Pada Unit Sedimentasi IPAM PDAM Ngagel III	45

4.3.1 Analisis Pengaruh <i>Spacer</i> Terhadap Parameter Kualitas	46
4.3.2 Analisis Pengaruh <i>Spacer</i> Terhadap Parameter Kuantitas	56
4.4 Analisis Pengaruh Tekanan dan <i>Spacer</i> Terbaik Terhadap Parameter Kualitas dan Kuantitas	60
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	63
5.1 Kesimpulan.....	63
5.2 Saran	63
DAFTAR PUSTAKA	65
LAMPIRAN 1	71
LAMPIRAN 2	75
LAMPIRAN 3	77
LAMPIRAN 4	79
LAMPIRAN 5	81
LAMPIRAN 6	83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Diagram Alir Pengolahan IPAM PDAM Ngagel III	5
Gambar 2. 2 (a) Unit Sedimentasi IPAM PDAM Ngagel III Surabaya, (b) Kanal III	5
Gambar 2. 3 Sketsa Metode Aliran <i>Dead-end</i>	8
Gambar 2. 4 Sketsa Metode Aliran <i>Cross-Flow</i>	8
Gambar 2. 5 Fluks Sebagai Fungsi Waktu	9
Gambar 2. 6 Jenis Fouling Pada Membran.....	10
Gambar 2. 7 Prinsip Kemiringan Plat Settler	11
Gambar 2. 8 Filter IPAM PDAM Ngagel III	13
Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian.....	18
Gambar 3. 2 Unit <i>Clearator</i> IPAM PDAM Ngagel I.....	19
Gambar 3. 3 Unit <i>Accelerator</i> IPAM PDAM Ngagel II.....	19
Gambar 3. 4 Unit Sedimentasi IPAM PDAM Ngagel III.....	20
Gambar 3. 5 Pengecekan Tekanan dan Debit Membran	21
Gambar 3. 6 Skema Reaktor Immersed Membrane Mikrofiltrasi	21
Gambar 3. 7 Reaktor Membran Terendam (a) Tampak depan; (b) Tampak Samping; (c) Potongan A-A; dan (d) Tampak Atas	22
Gambar 3. 8 Skema Kemiringan <i>Spacer</i>	22
Gambar 3. 9 Reaktor Tidak Terendam	23
Gambar 4.1 Pengaruh Tekanan Terhadap Konsentrasi Efluen Kekeruhan.....	31
Gambar 4.2 Pengaruh Tekanan Terhadap Nilai Koefisien Rejeksi (%R) Kekeruhan.....	31
Gambar 4.3 Pengaruh Tekanan Terhadap Konsentrasi Efluen TSS.....	32
Gambar 4.4 Pengaruh Tekanan Terhadap Nilai Koefisien Rejeksi (%R) TSS	33
Gambar 4.5 Pengaruh Tekanan Terhadap Konsentrasi Efluen Zat Organik	34
Gambar 4.6 Pengaruh Tekanan Terhadap Nilai Koefisien Rejeksi (%R) Zat Organik.....	35
Gambar 4.7 Pengaruh Tekanan Terhadap Konsentrasi Efluen Mikroplastik.....	36
Gambar 4.8 Partikel Mikroplastik Serat (fiber), (a) Hitam, (b) Transparan, (c) Merah), (d) Biru	37
Gambar 4.9 Pengaruh Tekanan Terhadap Nilai Koefisien Rejeksi (%R) Mikroplastik	37
Gambar 4.10 Pengaruh Tekanan Terhadap Konsentrasi Efluen Total <i>Coliform</i>	38
Gambar 4.11 Pengaruh Tekanan Terhadap Nilai Koefisien Rejeksi (%R) Total <i>Coliform</i>	39
Gambar 4.12 Pengaruh Tekanan Terhadap Konsentrasi Efluen <i>E. coli</i>	40
Gambar 4.13 Pengaruh Tekanan Terhadap Nilai Koefisien Rejeksi (%R) <i>E. coli</i>	40
Gambar 4.14 Pengaruh Tekanan Terhadap Nilai Fluks	42
Gambar 4.15 Pengaruh Variasi Tekanan 0,9 bar Terhadap Nilai Fluks.....	43
Gambar 4.16 Pengaruh Variasi Tekanan 0,7 bar Terhadap Nilai Fluks.....	44
Gambar 4.17 Pengaruh Variasi Tekanan 0,6 bar Terhadap Nilai Fluks.....	45
Gambar 4.18 Pengaruh <i>Spacer</i> Terhadap Konsentrasi Efluen Kekeruhan.....	47
Gambar 4.19 Pengaruh <i>Spacer</i> Terhadap Nilai Koefisien Rejeksi (%R) Kekeruhan	47
Gambar 4.20 Pengaruh <i>Spacer</i> Terhadap Konsentrasi Efluen TSS	48
Gambar 4.21 Pengaruh <i>Spacer</i> Terhadap Nilai Koefisien Rejeksi (%R) TSS.....	49
Gambar 4.22 Pengaruh <i>Spacer</i> Terhadap Konsentrasi Efluen Zat Organik.....	50
Gambar 4.23 Pengaruh <i>Spacer</i> Terhadap Nilai Koefisien Rejeksi (%R) Zat Organik	50
Gambar 4.24 Pengaruh <i>Spacer</i> Terhadap Konsentrasi Efluen Mikroplastik.....	51
Gambar 4.25 Pengaruh <i>Spacer</i> Terhadap Nilai Koefisien Rejeksi (%R) Mikroplastik	52
Gambar 4.26 Pengaruh <i>Spacer</i> Terhadap Konsentrasi Efluen Total <i>Coliform</i>	53

Gambar 4.27 Grafik Pengaruh <i>Spacer</i> Terhadap Nilai Koefisien Rejeksi (%R) Total <i>Coliform</i>	54
Gambar 4.28 Pengaruh <i>Spacer</i> Terhadap Konsentrasi Efluen <i>E. coli</i>	55
Gambar 4.29 Pengaruh <i>Spacer</i> Terhadap Nilai Koefisien Rejeksi (%R) <i>E. coli</i>	55
Gambar 4.30 Pengaruh <i>Spacer</i> Terhadap Nilai Fluks.....	57
Gambar 4.31 Morfologi Pengotoran Membran (a) M1, (b) M2, (c) M3, dan (d) M4 setelah operasi	59

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik Material Organik.....	7
Tabel 2.2 Perbandingan Membran Terendam (<i>Immersed</i>) dan Tidak Terendam (<i>Side-stream</i>)	12
Tabel 2.3 Spesifikasi Media Filter IPAM PDAM Ngagel III	13
Tabel 2.4 Perbandingan Filter Pasir dan Filter Membran	14
Tabel 2.5 Tekanan Operasi Membran dan Pengaruhnya.....	14
Tabel 2.6 Penambahan <i>Spacer</i> dan Pengaruhnya.....	16
Tabel 3.1 Kondisi Penelitian.....	25
Tabel 3.2 Parameter dan Metode Pengujian Kualitas Air	26
Tabel 4.1 Hasil Uji Karakteristik Kualitas Air Umpan (Feed).....	27
Tabel 4.2 Pengaruh Tekanan Terhadap Volume Permeate dan Lama Operasi Membran	42
Tabel 4.3 Pengaruh <i>Spacer</i> Terhadap Volume Permeat dan Nilai Fluks Rata-rata	58
Tabel 4.4 Nilai NRe Tiap Variasi <i>Spacer</i>	59
Tabel 4.5 Pengaruh Tekanan Terhadap Parameter Kualitas dan Kuantitas	61
Tabel 4.6 Pengaruh <i>Spacer</i> Terhadap Parameter Kualitas dan Kuantitas	61

Halaman sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertambahan jumlah penduduk dan perkembangan sektor industri yang pesat pada saat ini menyebabkan semakin tingginya tingkat pencemaran Kali Surabaya. Berdasarkan hasil penelitian Said & Hartaja, (2018) tingkat pencemaran Kali Surabaya tahun 2015-2017 dikategorikan sedang hingga berat. Kali Surabaya merupakan sumber air baku bagi Kota Surabaya yang dikelola oleh Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Surya Sembada Kota Surabaya. Sebagai produsen air bersih, pengolahan air yang diterapkan pada PDAM Kota Surabaya masih menggunakan proses konvensional yaitu dengan pengendapan kimia. Penurunan kualitas air baku menyebabkan biaya operasional dan pemeliharaan akan meningkat, kebutuhan luas lahan membesar, operasional dan perawatan menjadi rumit untuk dapat menghasilkan air yang sesuai dengan persyaratan kualitas air minum pada Permenkes No. 492 Tahun 2010 (Mahardini & Kusuma, 2002; Said & Hartaja, 2018). Hal ini mendorong adanya pemikiran untuk memodifikasi pengolahan air minum eksisting dengan teknologi baru.

Teknologi membran merupakan teknologi yang sangat andal dalam pengolahan air dan air limbah (Rahmawati *et al.*, 2019). Membran Mikrofiltrasi (MF) dan Ultrafiltrasi (UF) terendam (*immersed*) telah banyak diterapkan pada sektor pengolahan air (Lebeau *et al.*, 1998) dan air limbah (Al-Shammari *et al.*, 2012) yang dapat dikombinasikan dengan pengolahan konvensional (Judd & Hillis, 2001) juga pada industri farmasi (Baker, 2004) dan makanan (Novianto *et al.*, 2013). Menurut Wenten, (2004) teknologi ini merupakan teknologi bersih yang ramah lingkungan karena tidak menambahkan bahan kimia (koagulan, flokulan) seperti pada pengolahan air konvensional. Meski demikian, kinerja membran dapat berubah seiring dengan waktu karena adanya pengotoran yang terjadi di permukaan membran yang disebut *fouling* (Rahmawati *et al.*, 2019). *Fouling* terjadi karena adanya akumulasi, deposisi dan interaksi fisik-kimia antara kandungan pada air umpan dengan permukaan membran (Chen *et al.*, 1997; Mulder, 1996). Fenomena *fouling* dapat menurunkan produktivitas membran karena adanya peningkatan retensi membran terhadap permeat (filtrat) akibat menurunnya permeabilitas dan fluks membran. Oleh karena itu, perlu adanya strategi yang efektif untuk mengontrol *fouling* dan mempertahankan fluks agar dapat meminimalisasi konsumsi energi dan biaya operasional (Field *et al.*, 1995; Yamamura *et al.*, 2007).

Perpindahan massa pada membran mikrofiltrasi terjadi karena adanya tekanan sebagai gaya dorong (*driving force*) yang diberikan dalam umpan (*feed*). Tekanan operasi yang optimal membantu penyisihan produk (permeat) melalui permukaan membran sedangkan konsentrat (retentat) akan direjeksi oleh membran (Wenten, 2016). Akan tetapi, penurunan fluks yang terjadi karena *fouling* menyebabkan penurunan tekanan sehingga kualitas air akan semakin buruk (Kerdi *et al.*, 2020). Salah satu strategi yang berhasil diterapkan untuk menjaga fluks tetap stabil adalah dengan pemberian sekat (*spacer*) pada membran (Rahmawati *et al.*, 2021). Penggunaan *spacer* dapat meningkatkan fluks kritis hingga 100%, kontrol terhadap *fouling* meningkat dan konsumsi energi menjadi rendah (Fritzmman *et al.*, 2013; Tan *et al.*, 2019). Efisiensi kontrol *fouling* menggunakan *spacer* dipengaruhi oleh morfologi, material, jarak, geometri, ketebalan serta sudut internal *spacer* (Kerdi *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2019). Dalam percobaan Rahmawati *et al.*, (2019) menggunakan *spacer* bersirip dengan konfigurasi sudut sirip 45° mampu meningkatkan permeabilitas membran hingga 87%. Orientasi sudut pada *spacer* juga mampu meningkatkan perpindahan massa pada membran (Taamneh & Bataineh, 2017).

Membran mikrofiltrasi pada umumnya tersusun dari dua jenis material yang berbeda, yaitu polimer dan keramik (Koyuncu *et al.*, 2015). Dibandingkan material polimer, membran

mikrofiltrasi keramik memiliki stabilitas suhu, tekanan, fisik dan konsentrasi bahan kimia yang lebih baik. Membran keramik mampu mengontrol *fouling* dan penurunan fluks dengan baik sehingga mampu memperpanjang masa pakai membran (Campinas *et al.*, 2021; Guerra & Pellegrino, 2013; Lee *et al.*, 2013). Zat organik, kekeruhan dan TSS merupakan salah satu penyebab terjadinya *irreversible fouling* pada membran. Namun, hal tersebut mampu diminimalisasi dengan penggunaan membran keramik (Mueller *et al.*, 2010; Park *et al.*, 2020; Yamamura *et al.*, 2007). Keberadaan mikroplastik, total *coliform* dan *E. coli* pada air permukaan berpotensi meningkatkan gangguan kesehatan manusia (Kasam *et al.*, 2009; Ma *et al.*, 2019). Membran keramik mikrofiltrasi dapat menjadi alternatif dalam penyisihan mikroplastik dengan ukuran partikel terkecil antara 1 μm – 1 mm. Selain itu, membran keramik berpotensi menyisihkan *E. coli* hingga 98% (Kasam *et al.*, 2009; Lestari *et al.*, 2020).

Penelitian menguji kinerja membran keramik mikrofiltrasi terendam (*immersed*) terhadap variabel tekanan dan *spacer* untuk mengetahui pengaruhnya pada fluks, volume produksi air (permeat) dan lama operasi membran sebelum *fouling*. Pengkajian parameter kualitas membran meliputi nilai kekeruhan, TSS, zat organik, mikroplastik, total *coliform* dan *E. coli* menggunakan aliran *cross-flow*. Aliran *cross-flow* diterapkan untuk mengurangi penumpukan pengotor pada permukaan membran (Wang *et al.*, 2011). Operasi membran keramik mikrofiltrasi dilakukan secara terendam pada unit sedimentasi IPAM PDAM Ngagel III Surabaya menggunakan tekanan negatif (Lebeau *et al.*, 1998). Penerapan variabel tekanan membran dan *spacer* pada membran mikrofiltrasi diharapkan mampu meningkatkan kinerja membran serta mengurangi terjadinya *fouling*.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini antara lain:

1. Bagaimana pengaruh variasi tekanan membran terhadap parameter kualitas dan kuantitas pada permeat?
2. Bagaimana pengaruh variasi *spacer* terhadap parameter kualitas dan kuantitas pada permeat?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini antara lain:

1. Mengkaji pengaruh variasi tekanan membran terhadap parameter kualitas dan kuantitas pada permeat
2. Mengkaji pengaruh variasi *spacer* terhadap parameter kualitas dan kuantitas pada permeat

1.4 Ruang Lingkup

1. Penelitian ini dilakukan pada unit sedimentasi Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) PDAM Ngagel III Surabaya menggunakan membran keramik mikrofiltrasi *flat-sheet* secara terendam dengan aliran *cross-flow*
2. Sampel *feed water* yang digunakan berasal dari unit sedimentasi yang telah melalui unit flokulasi PDAM Ngagel III Surabaya
3. Kinerja membran diukur berdasarkan parameter kualitas dan kuantitas. Parameter kualitas air yang digunakan yaitu nilai kekeruhan, TSS, mikroplastik, zat organik, total *coliform* dan *E. coli*. Sedangkan parameter kuantitas meliputi nilai fluks, volume permeat dan lama operasi membran
4. Baku mutu efluen permeat mengacu pada Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor No.492 Tahun 2010 Tentang Persyaratan Kualitas Air Minum.
5. Operasi sistem membran menggunakan pompa hisap tekanan negatif

6. Variabel yang diuji yaitu :
 - a. Tekanan membran, dengan variasi tekanan 0,6 bar, 0,7 bar, 0,9 bar.
 - b. *Spacer*, dengan variasi tanpa *spacer*, kemiringan *spacer* 90°, 75° dan 105°

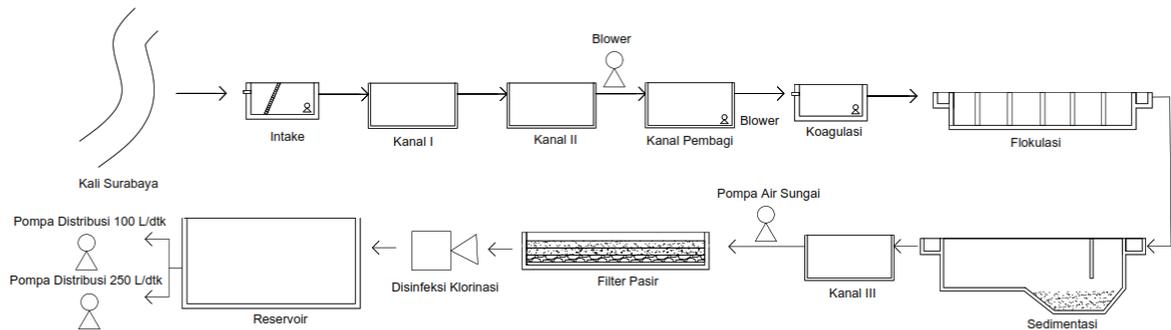
1.5 Manfaat

- 1 Memberikan informasi mengenai pengaruh tekanan dan *spacer* terhadap kinerja *immersed membrane* mikrofiltrasi serta penerapannya pada unit sedimentasi Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM)
- 2 Memberikan solusi berupa alternatif teknologi pengolahan air baku untuk unit pengolahan air minum eksisting
- 3 Memberikan kontribusi pengembangan desain sistem pengolahan air minum yang lebih *compact* dan hemat lahan dengan aplikasi membran terendam

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Unit Sedimentasi IPAM PDAM Ngagel III Surabaya

PDAM Kota Surabaya mengelola 6 Lokasi Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM), salah satunya adalah IPAM PDAM Ngagel III Surabaya. IPAM PDAM Ngagel III mulai beroperasi di tahun 1982 berdasarkan hasil rancangan Neptune Microfloc (USA). Menurut Rencana Induk Sistem Penyediaan Air Minum (RISPAM) Kota Surabaya, IPAM PDAM Ngagel III Kota Surabaya menggunakan Kali Surabaya sebagai air baku dengan kapasitas pengolahan 1750 liter/detik. Sistem aliran yang digunakan adalah sistem gravitasi pada DAM Jagir yang dialirkan melalui kanal menuju bak sedimentasi seperti Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Diagram Alir Pengolahan IPAM PDAM Ngagel III

Sebelum air menuju bak sedimentasi dilakukan pembubuhan bahan kimia berupa tawas dan polimer kemudian dilakukan proses flokulasi dengan flokulator *baffled channel* untuk membentuk flok. Efluen dari flokulator akan dialirkan menuju bak sedimentasi (PDAM Surya Sembada, 2013). Mekanisme proses pada bak sedimentasi adalah pemisahan partikel solid dari suspensi menggunakan gaya gravitasi (Al Layla, 1978). IPAM PDAM Ngagel III memiliki 6 unit sedimentasi konvensional tanpa adanya penambahan settler dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Panjang = 95 meter
- Lebar = 28 meter
- Kedalaman = 1,5-3 meter
- Freeboard = 0,2 meter
- Debit = 7,2 m³/hari
- Waktu tinggal = 5 jam

Bak sedimentasi IPAM PDAM Ngagel III dilengkapi dengan 6 *gutter* pada setiap unitnya seperti pada Gambar 2.2. Efluen dari proses sedimentasi akan ditampung pada kanal III kemudian dipompa menuju unit aerasi dan filtrasi.



Gambar 2.2 (a) Unit Sedimentasi IPAM PDAM Ngagel III Surabaya, (b) Kanal III
Sumber: Dokumentasi

2.2 Karakteristik Membran Mikrofiltrasi

Membran merupakan lapisan tipis yang berfungsi sebagai pemisahan komponen dengan spesi yang berbeda berdasarkan sifat permeabilitasnya. Teknologi membran merupakan teknologi bersih yang ramah lingkungan karena tidak menambahkan bahan kimia (koagulan, flokulan) seperti pada pengolahan air konvensional. Teknologi membran juga dapat dikombinasikan dengan teknologi pengolahan air minum eksisting (Wenten, 2004). Terdapat 4 jenis membran berdasarkan gaya dorong berupa tekanan yang digunakan yaitu membran Mikrofiltrasi (MF), Ultrafiltrasi (UF), Reverse Osmosis (RO) dan Nanofiltrasi (NF). Berdasarkan ukuran porinya, membran MF memiliki ukuran pori terbesar dan membran RO memiliki ukuran pori terkecil (Wenten *et al.*, 2010).

2.2.1 Tekanan

Membran mikrofiltrasi merupakan salah satu teknologi membran yang menggunakan gaya dorong (*driving force*) berupa tekanan kurang dari 2 bar (Wang *et al.*, 2011). Perbedaan tekanan pada membran menyebabkan terjadinya perpindahan massa air melalui membran. Untuk dapat melalui pori membran, dibutuhkan tekanan minimum pada cairan yang disebut tekanan *breakthrough* dengan mempertimbangkan material dan ukuran pori membran (Redjeki, 2011). Dalam operasionalnya, waktu operasi membran mikrofiltrasi biasanya diukur dalam satuan jam (Baker, 2004)

2.2.2 Ukuran Pori dan Morfologi

Pada umumnya ukuran membran mikrofiltrasi berada diantara 0,02 μm sampai 10 μm dengan ketebalan 10 μm sampai 150 μm (Redjeki, 2011). Apabila diperhatikan morfologi polimer penyusunnya, maka susunan membran mikrofiltrasi dapat dibedakan menjadi 2 kategori yaitu:

a. Membran Simetrik

Membran berpori simetrik merupakan membran dengan struktur pori yang homogen pada seluruh permukaannya. Pada umumnya membran simetrik memiliki ukuran lebih besar dibandingkan membran berpori asimetrik. Membran berpori simetrik memiliki ukuran antara 1-10 μm . dan ketebalan 10-150 μm . Struktur morfologi membran simetrik memungkinkan partikel pengotor lebih cepat menyumbat pori membran sehingga terjadi *fouling* (Mulder, 1996).

b. Membran Asimetrik

Membran berpori asimetrik memiliki ukuran pori lebih kecil dibandingkan membran simetrik yaitu antara 0,05-1 μm . Membran asimetrik memiliki 2 lapisan penyusun, yaitu lapisan tipis dan rapat dengan ketebalan 0,1-0,5 μm dan lapisan berpori besar dengan ketebalan 50-150 μm . Kondisi struktur morfologi pada membran asimetrik memungkinkan membran ini memiliki tingkat pemisahan partikel yang tinggi karena kerapatan pada lapisan membran serta kecepatan transport permeat yang tinggi (Mulder, 1996).

Perbedaan ukuran pori sangat penting untuk dipertimbangkan dalam pemilihan membran mikrofiltrasi karena prinsip pemisahan mikrofiltrasi didasarkan pada ukuran partikel yang akan dipisahkan (*size exclusion*) atau berdasarkan transport saringan (*sieving*) (Baker, 2004; Wang *et al.*, 2011). Oleh karena itu, partikel yang dapat dipisahkan menggunakan membran mikrofiltrasi terbatas pada partikel tersuspensi, koloid, bakteri dan beberapa virus dengan ukuran tertentu (Warsinger *et al.*, 2018)

2.2.3 Material Membran

Pada umumnya kinerja membran tergantung pula pada karakteristik material membrannya. Material penyusun membran mikrofiltrasi digolongkan menjadi 2 kategori:

a. Material Organik

Material organik memiliki penyusun utama berupa polimer. Beberapa jenis polimer yang sering digunakan sebagai bahan membran mikrofiltrasi antara lain polysulfon (PS), polypropilen (PP), polyviniliden fluorida (PVDF), polyamida (PA), polyvinil klorida (PVC), dan polyakrilo nitril (PAN), selulosa asetat (CA), polyester sulfon (PES), Polyetilen (PE) (Warsinger *et al.*, 2018). Pada umumnya bahan polimer banyak digunakan karena lebih murah dan mudah dalam pembentukan struktur porinya (Koyuncu *et al.*, 2015). Pemilihan membran polimer dapat dibandingkan berdasarkan karakteristik materialnya terhadap kinerja membran seperti Tabel 2.1 (Warsinger *et al.*, 2018).

Tabel 2.1 Karakteristik Material Organik

No	Material	Akronim	Kekuatan mekanik & durabilitas	Hidrofilisitas	Resistensi klorin	Sudut kontak	pH
1	Polysulfone	PSU	√√	√	√√	75°	1-13
2	Polyethersulfone	PES	√√	√	√√	70°	1-13
3	Polyacrylonitrile	PAN	√	√√	-	60°	
4	Polyvinylidene fluoride	PVDF	√√	X	√	100°	2-11
5	Polyethylene	PE	√	X	X		
6	Polypropylene	PP	√	√	X		2-13
7	Polyvinyl chloride	PVC	X	X	-		
8	Cellulose Acetate	CA	X	√√√	√√		5-8,5
9	Polyamide	PA	√	√√	X	55°	1-13

Sumber: Warsinger *et al.*, 2018

Keterangan:

√√√ = Sangat Baik

√√ = Baik

√ = Cukup

X = Buruk

b. Material Anorganik

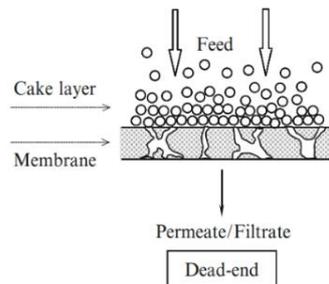
Material anorganik yang digunakan pada teknologi membran adalah keramik yang terbuat dari alumina (Al₂O₃), zirkonia dioksida (ZrO₂), dan titanium dioksida (TiO₂) (Guerra & Pellegrino, 2013). Kemampuannya dalam menahan konsentrasi tinggi dari klorin, oksidan dan koagulan memungkinkan secara teori untuk menyisihkan virus dengan ukuran tertentu. Selain itu, membran keramik mampu menyisihkan *Natural Organic Matter* (NOM) serta kekeruhan tinggi dengan konsumsi energi yang rendah dan frekuensi pembersihan yang relatif lebih sedikit dibandingkan membran polimer (Park *et al.*, 2020; Warsinger *et al.*, 2018). Oleh karena itu, membran keramik mampu mengontrol *fouling* dan penurunan fluks dengan baik sehingga mampu memperpanjang masa pakai membran (Campinas *et al.*, 2021; Guerra & Pellegrino, 2013)

2.3 Metode Operasi Membran

Filtrasi membran pada umumnya dapat dioperasikan dengan 2 metode aliran yaitu aliran *dead-end* dan aliran *cross-flow*

a. Metode *Dead-end*

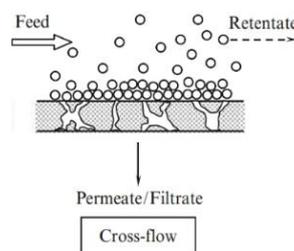
Metode aliran *dead-end* merupakan desain aliran yang paling sederhana. Pada metode ini, air umpan dialirkan melalui membran secara tegak lurus sehingga partikel yang tertahan beserta komponen lainnya akan menumpuk pada permukaan membran seperti Gambar 2.3 akumulasi partikel pada permukaan membran menyebabkan peningkatan tekanan yang dibutuhkan untuk mempertahankan aliran. Ketika fluks minimum tidak tercapai, membran perlu dibersihkan atau diganti. Pada umumnya, aliran *dead-end* digunakan pada lingkungan atau sumber air yang terbatas jumlahnya dalam sistem *batch*. Metode ini menyebabkan penumpukan kotoran menjadi lebih cepat dan tersumbat (*fouling*), sehingga membutuhkan pembersihan secara intensif (Baker, 2004; Wang *et al.*, 2011)



Gambar 2. 3 Sketsa Metode Aliran *Dead-end*
Sumber: Wang *et al.*, 2011

b. Metode *Cross-flow*

Aliran metode *cross-flow* merupakan aliran yang paling banyak digunakan saat ini. Pada sistem operasi menggunakan *cross-flow*, air umpan dilewatkan sejajar dengan permukaan membran seperti Gambar 2.4 dengan kecepatan antara 0,5-5 m/s, sehingga penumpukan kotoran dapat diminimalisasi. Tipe aliran *cross-flow* direkomendasikan pada kondisi air yang mengandung koloid dan TSS tinggi karena metode ini memiliki kecenderungan terhadap *fouling* yang lebih rendah dibandingkan metode *dead-end*. Oleh karena itu, metode ini lebih banyak diaplikasikan pada industri. Namun, metode ini membutuhkan peralatan yang kompleks dan biaya operasi yang besar (Mulder, 1996; Wang *et al.*, 2011)



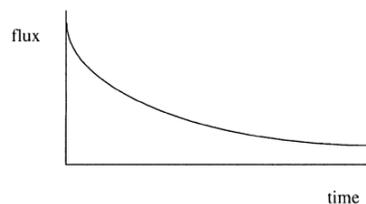
Gambar 2.4 Sketsa Metode Aliran *Cross-Flow*
Sumber: Wang *et al.*, 2011

2.4 Parameter Kinerja Membran

Parameter utama efisiensi kinerja membran dipengaruhi oleh permeabilitas, selektivitas, konsentrasi polarisasi dan fenomena *fouling* (Mulder, 1996).

a. Permeabilitas

Permeabilitas merupakan salah satu tolak ukur untuk parameter kuantitas, karena permeabilitas merupakan ukuran kecepatan dari suatu spesi (permeat) ketika menembus membran. Permeabilitas sangat dipengaruhi oleh jumlah pori, ukuran pori, tekanan yang dioperasikan serta ketebalan membran. Dalam pengukuran, permeabilitas membran dinyatakan dalam fluks. Fluks merupakan jumlah volume permeat yang telah melewati satu satuan luas membran dalam waktu tertentu (Mulder, 1996). Laju fluks akan menurun sejalan dengan waktu (*irreversible*) seperti pada Gambar 2.5 akibat adanya polarisasi konsentrasi, adsorpsi, kompaksi dan *fouling* (Wenten *et al.*, 2013).



Gambar 2.5 Fluks Sebagai Fungsi Waktu
Sumber: Mulder, 1996

Menurut Mulder, (1996) secara matematis fluks dirumuskan sebagai berikut:

$$J = \frac{V}{A \times t}$$

Dimana :

J = Fluks (L/m².jam)

V = Volume Permeat (mL)

A = Luas Permukaan membran (m²)

t = Waktu (jam)

b. Selektivitas

Selektivitas merupakan salah satu tolak ukur untuk parameter kualitas, karena selektivitas merupakan kemampuan membran untuk membedakan komponen dalam suatu aliran serta memisahkannya dari suatu fase ke fase lainnya. Pada umumnya, fenomena fluks berbanding terbalik dengan selektivitas. Selektivitas pada membran dapat diukur dengan koefisien rejeksi. Koefisien rejeksi merupakan ukuran seberapa handal suatu membran menyisahkan komponen tertentu (*solute*) sehingga dapat dihasilkan kualitas permeat yang baik. Semakin besar nilai koefisien rejeksi maka semakin baik kinerja membran. Koefisien rejeksi pada membran dapat diketahui dengan persamaan sebagai berikut:

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_f} \times 100\%$$

Dimana:

R = Koefisien Rejeksi (%)

C_p = Konsentrasi zat terlarut dalam permeat

C_f = Konsentrasi zat terlarut dalam umpan

Harga R berkisar antara 0 sampai 100%. Jika harga R = 100% artinya zat kontaminan telah disisahkan oleh membran dengan sempurna (Mulder, 1996)

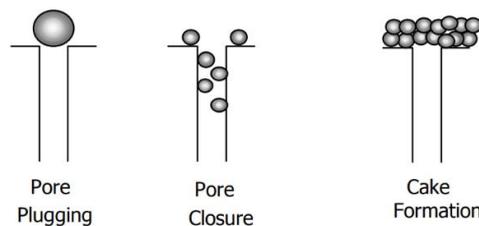
c. Polarisasi Konsentrasi

Ketika filtrasi berlangsung zat terlarut tidak semuanya lewat ke sisi permeat, tetapi akan tertahan pada permukaan membran. Konsentrasi zat terlarut pada permukaan membran tersebut jauh lebih besar dari konsentrasi zat pelarut pada permeat atau pada umpan.

Fenomena peningkatan konsentrasi pada sebagian permukaan membran dikenal dengan istilah polarisasi. Polarisasi konsentrasi menyebabkan menurunnya fluks, menurunnya efisiensi membran dan meningkatkan konsumsi energi. Namun, polarisasi konsentrasi merupakan peristiwa yang dapat dibalikkan (*reversible*), karena dampaknya dapat dikurangi atau dihilangkan dengan menurunkan tekanan operasi atau menurunkan konsentrasi umpan (Redjeki, 2011).

d. Fenomena *fouling*

Dalam proses filtrasi, seiring bertambahnya waktu kinerja membran mikrofiltrasi akan mengalami penurunan. Hal ini dikarenakan adanya penumpukan partikel tersuspensi, koloid, makromolekul, senyawa organik atau anorganik, dan mikroorganisme yang disebut *foulant* mampu menyumbat pori-pori membran sehingga menyebabkan penurunan jumlah produk (permeat) yang dapat difilter sehingga disebut *fouling* (Rahmawati *et al.*, 2021; Wenten *et al.*, 2013). Terdapat 2 kategori *fouling*, yaitu *reversible* dan *irreversible fouling*. *Reversible fouling* terjadi apabila akumulasi materi pada permukaan membran bersifat mudah dihilangkan. *Irreversible fouling* terjadi apabila pori membran telah tersumbat oleh materi pengotor sehingga lebih sulit untuk dihilangkan (Kramer *et al.*, 2020). *Fouling* dapat terjadi dalam berbagai bentuk, yaitu adsorpsi akibat interaksi antara membran dan partikel, penyumbatan pori membran pembentukan *cake layer* karena deposisi partikel pada permukaan membran serta pembentukan *gel layer* akibat polarisasi konsentrasi seperti Gambar 2.5 (Mohammad *et al.*, 2015).



Gambar 2.6 Jenis Fouling Pada Membran
Sumber: Riduan, 2003

Terjadinya *fouling* merupakan fenomena yang sulit untuk diketahui. Menurut Wang *et al.*, (2011) terjadinya *fouling* berkaitan dengan karakteristik *feed* yang masuk (pH, konsentrasi, kekuatan ionik, dan interaksi antar unsur), karakteristik membran (hidrofobisitas, muatan, kekasaran, ukuran pori, distribusi ukuran pori dan porositasnya) serta kondisi hidrodinamis ketika operasi membran berupa tekanan transmembran (TMP), fluks, suhu dan kecepatan aliran *cross-flow*.

2.5 Mitigasi *Fouling* Pada Operasi Membran

Pencegahan fenomena *fouling* pada membran dapat dilakukan dengan memodifikasi membran, mengoptimalkan kondisi operasi membran, melakukan pencucian, atau melakukan *pre-treatment* sebelum operasi membran. Salah satu upaya optimalisasi kondisi operasi membran untuk mengurangi penumpukan materi pada permukaan membran dapat dilakukan dengan mengatur tekanan dan memberikan *spacer* (sekat) pada membran (Goh *et al.*, 2018).

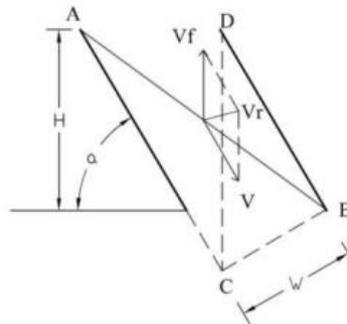
2.5.1 Tekanan Operasi

Adanya perbedaan tekanan pada membran menyebabkan permeat dapat melewati permukaan membran sedangkan partikel tersuspensi akan tersisihkan. Ketika filtrasi berlangsung, ukuran partikel yang mampu disisihkan akan berkurang karena terjadinya *fouling* menyebabkan mengecilnya pori membran. Oleh karena itu, untuk meningkatkan resistensi perpindahan massa pada membran dibutuhkan tekanan yang lebih besar agar fluks membran

meningkat. Apabila *fouling* pada membran tidak dikontrol, akan memberikan pengaruh terhadap penurunan tekanan membran. Sehingga, fluks membran akan menurun, permeabilitas membran akan menurun dan konsumsi energi menjadi lebih besar (Baker, 2004; Mulder, 1996).

2.5.2 *Spacer* (sekat)

Spacer merupakan pengatur jarak antar membran sebagai pemisah dan pengatur kontrol *feed* pada permukaan membran. Penambahan *spacer* telah digunakan pada penelitian membran untuk memperluas pencampuran *feed* pada permukaan membran, meminimalisi tekanan yang hilang dan mencegah polarisasi konsentrasi pada permukaan membran (Fritzmann *et al.*, 2013; Redjeki, 2011). *Spacer* dapat meningkatkan turbulensi di area permukaan membran sehingga mampu mengurangi *fouling* dan polarisasi konsentrasi (Goh *et al.*, 2018). Dalam operasinya, kinerja *spacer* dipengaruhi oleh ketebalan, sudut kontak, material serta morfologinya. Hal ini dikarenakan geometri *spacer* berperan penting dalam peningkatan fluks membran dan pencegahan *fouling* pada membran (Kerdi *et al.*, 2020). Kemiringan sudut kontak pada *spacer* akan mempengaruhi luas bidang aliran *feed*. Hal ini sejalan dengan konsep yang diterapkan pada *plate settler* dalam unit sedimentasi dimana kemiringan plat mampu mempengaruhi kecepatan pemisahan partikel tersuspensi, luas bidang pengendapan dan meningkatkan efisiensi pengendapan seperti Gambar 2.7 (Pratiwi & Hermana, 2014). Dengan memberikan kemiringan yang optimal, lintasan partikel akan berubah sehingga partikel akan mudah menempel pada permukaan plat dibandingkan dengan tanpa kemiringan (sudut 90°) (Husaeni *et al.*, 2016). Oleh karena itu, penerapan *spacer* berpotensi menahan partikel pengotor untuk terakumulasi pada *spacer* sebelum mencapai permukaan membran (Kerdi *et al.*, 2020)



Gambar 2.7 Prinsip Kemiringan Plat Settler
Sumber: (Pratiwi & Hermana, 2014)

2.6 Membran Filtrasi Terendam (*Immersed*)

Konfigurasi membran dapat dikategorikan menjadi dua sistem, yaitu sistem *side-stream* dan sistem terendam (*immersed*). Konfigurasi membran terendam lebih ekonomis dan membutuhkan konsumsi energi yang rendah dibandingkan konfigurasi membran *side-stream*. Pengolahan air limbah perkotaan lebih banyak menggunakan sistem membran terendam karena lebih hemat energi dan ruang (Oever, 2005). Meskipun fluks akhir operasi rendah, tetapi sistem membran terendam sangat disukai karena konsumsi energi yang dibutuhkan lebih rendah. Oleh karena itu, sistem membran terendam berpotensi diterapkan dalam skala yang lebih besar (Al-Shammari *et al.*, 2012). Sistem membran terendam cocok diimplementasikan sebagai unit tambahan pada instalasi konvensional karena mudah dimasukkan pada bak filter eksisting. Membran dalam hal ini juga dapat menggantikan peran kolam sedimentasi untuk memisahkan padatan dan cairan pada teknologi konvensional (lumpur aktif). Penggunaan membran menghasilkan kinerja pemisahan menjadi lebih baik karena pemisahan tidak lagi dibatasi oleh kondisi hidrodinamik lumpur. Berdasarkan kedua sistem, yang sering digunakan adalah

Immersed membrane karena energi yang digunakan lebih kecil (Hernaningsih, 2018). Perbandingan kedua sistem tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Perbandingan Membran Terendam (*Immersed*) dan Tidak Terendam (*Side-stream*)

Parameter	<i>Immersed</i>	<i>Side-stream</i>
Tekanan Mikrofiltrasi	10-12 psi	20-30 psi
Biaya pemompaan	Sangat rendah, kecuali jika digunakan pompa hisap	tinggi
Biaya pemompaan	Sangat rendah, kecuali jika digunakan pompa hisap	tinggi
Ukuran/dimensi	Lebih besar	Lebih kecil
Kebutuhan untuk proses pembersihan	Lebih sedikit	Lebih tinggi
Biaya Investasi	Lebih tinggi	Lebih rendah

(Al-Shammari *et al.*, 2012; Malia dan Till, 2001)

2.7 Pencucian Membran

Adanya fenomena fouling menyebabkan perlunya regenerasi membran sehingga kinerja dan masa pakai membran menjadi lebih lama. Pengotoran yang telah menyumbat pori membran (*irreversible fouling*) membutuhkan pencucian menggunakan bahan kimia (Yamamura *et al.*, 2007). *Backwashing* merupakan salah satu cara pembersihan rongga membran yang dapat dilakukan dengan proses aliran balik secara periodik. *Backwashing* berfungsi untuk menghilangkan akumulasi kontaminan pada permukaan membran agar mampu mempertahankan fluks yang cukup dan meminimalkan laju *fouling* jangka panjang yang tidak dapat diubah (Wang *et al.*, 2011). Produsen membran mikrofiltrasi pada umumnya memberikan protokol *backwashing* serta rekomendasi frekuensi *backwash* yang dibutuhkan oleh membran mikrofiltrasi yang diproduksi. Untuk menentukan menentukan waktu pelaksanaan pembersihan membran mikrofiltrasi maka diperhatikan hal berikut ini:

- Apabila kapasitas produk sudah turun mendekati $\pm 15\%$ dari kapasitas produksi awal
- Apabila *rejected flow rate* sudah meningkat mendekati $\pm 5-10\%$ dari performa awal
- Apabila konduktivitas permeate/produk sudah naik hingga $\pm 15\%$ dari nilai konduktivitas awal
- Apabila tekanan pada membran sudah naik hingga $\pm 15\%$ dari nilai tekanan awal

2.8 Perbandingan Teknologi Membran dan Filter Konvensional

Filter pasir merupakan unit pengolahan air minum yang umum digunakan di Indonesia (Susanto, 2011). Pada umumnya filter pasir yang digunakan pada Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) terdiri dari lapisan pasir kuarsa, kerikil, antrasit atau karbon aktif dan bahan inert lainnya. Terdapat 2 kategori filter pasir, yaitu filter pasir lambat dan filter pasir cepat. Dalam prosesnya, air akan ditampung selama ± 12 jam hingga melewati lapisan filter dan dipompa untuk didistribusikan. Penyisihan mikroorganisme menggunakan filter pasir sangat terbatas oleh ukuran porinya yang hanya $10 \mu\text{m}$ secara teoritis. Oleh karena itu, hanya protozoa seperti *Cryptosporidium* dan *Giardia* yang mampu tersisihkan pada filter pasir terutama filter pasir cepat yang telah dilengkapi koagulasi pada awal prosesnya. Dengan tidak adanya *pre-treatment* secara fisik-kimia berupa koagulasi-flokulasi dan sedimentasi sebelum filter pasir maka kemungkinan protozoa untuk lolos dapat terjadi (Gray, 2014)

IPAM PDAM Ngagel III menerapkan filter pasir konvensional dalam proses pengolahan air minum sejak pertama kali beroperasi. Filter pasir yang beroperasi pada IPAM PDAM Ngagel III sebanyak 18 unit dengan sistem aliran gravitasi. Setiap unitnya terdiri dari media

pasir silika, antrasit dan kerikil sebagai penahan. Media tersebut akan menyaring partikel pengotor dalam air yang memiliki ukuran lebih besar dari rongga media. Pada saat filtrasi berlangsung juga terjadi reaksi oksidasi zat organik dengan bantuan mikroorganisme yang tertahan pada media (PDAM Surya Sembada, 2013).



Gambar 2.8 Filter IPAM PDAM Ngagel III
Sumber: Dokumentasi

Setelah proses filtrasi pada umumnya kekeruhan mampu berkurang hingga 0,4 NTU pada musim kemarau dan 0,7 NTU pada musim penghujan. Secara rata-rata efluen dari proses filtrasi menggunakan filter pasir yang ada mampu menurunkan kekeruhan <10 NTU. Spesifikasi filter pasir yang diterapkan pada IPAM PDAM Ngagel III secara rinci seperti berikut:

- Jumlah unit filter = 18 unit
- Tipe = Media ganda
- Arah aliran = *Sown flow*
- Pengaliran = Gravitasi
- Kecepatan filtrasi = 9,8 m/jam
- Waktu filtrasi = 12 jam/liter
- Panjang bak = 8,32 m
- Lebar bak = 3,57 m
- Kedalaman = 4 m
- Freeboard = 0,65 m (saat backwash)
- Sistem backwash = Otomatis
- Lama pencucian = 20-25 menit
- Kecepatan pencucian = 31 m/jam
- Pencucian permukaan = 5 menit

Spesifikasi media filter yang digunakan pada setiap unitnya secara rinci seperti pada Tabel 2.3

Tabel 2.3 Spesifikasi Media Filter IPAM PDAM Ngagel III

Media	Ukuran (mm)	Tinggi (mm)
Antrasit	1,0 s/d 1,1	450
Pasir silika halus padat	0,45 s/d 0,55	375
Kerikil I	4,76 s/d 9,52	75
Kerikil II	9,52 s/d 19,05	75
Kerikil III	19,05 s/d 36,10	75

Sumber: PDAM Surya Sembada, 2013

Pada filter membran proses pemisahan partikel terjadi secara fisik-kimia yang bersifat semipermeabel dengan berbagai material. Tidak seperti filter konvensional, filter membran tidak harus didahului oleh *pre-treatment*. Dalam prosesnya, air yang akan difilter akan dipompa melalui membran dengan tekanan tertentu sehingga akan menghasilkan produk (permeat) dan

partikel yang tersaring (retentat). Proses pemisahan yang terjadi pada membran bergantung pada ukuran mikroorganisme dan ukuran pori membran yang sesuai. Semakin kecil ukuran pori, semakin cepat filter akan tersumbat dan kecepatan air akan semakin lambat. Ada 4 tipe membran yang digunakan dalam instalasi pengolahan air berdasarkan gaya dorong tekanan yaitu membran Mikrofiltrasi (MF), Ultrafiltrasi (UF), Nanofiltrasi (NF) dan Reverse Osmosis (RO) (Wenten, 2016). Masing-masing membran memiliki kemampuan removal partikel yang berbeda-beda bergantung pada ukuran porinya. Menurut Gray, (2014) perbandingan filter pasir konvensional dengan beberapa filter membran yang digunakan dalam pengolahan air seperti pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Perbandingan Filter Pasir dan Filter Membran

	Filter pasir	Filter Membran			
		MF	UF	NF	RO
Tekanan Operasi (bar)	0.1-0.2	0.5-2.0	1-5	5-20	20-85
Ukuran pori (μm)	4.0	0.1	0.01	0.001	<0.001
Flowrate ($\text{Lm}^{-2}\text{h}^{-1}$)	2000-10000	100-1000	50-200	20-50	10-50
Partikel terkecil yang disisihkan	Suspended matter (<i>Cryptosporidium</i> , <i>Giardia</i>)	Koloid, bakteri (<i>E. coli</i> , <i>Salmonella</i> , <i>Cholera</i>)	Virus, Molekul organik besar (Rotavirus, Norovirus, Hepatitis-A)	Ion divalen (Ca^{2+} , Mg^{2+}), Molekul organik kecil	Semua materi tersuspensi (Nitrat, Arsen, Pestisida, Radionuklida)
Aplikasi	<i>Clarification</i>	<i>Clarification</i>	<i>Clarification</i>	Softening, penyisihan warna, penyisihan NOM, penyisihan mikropolutan	Desalinasi, penyisihan nitrat dan kontaminan lainnya
Kebutuhan pre-treatment	Koagulasi-flokulasi, sedimentasi	Tidak membutuhkan	Tidak membutuhkan	MF/UF	MF/UF

Sumber: (Gray, 2014)

2.9 Penelitian Terdahulu

Penelitian ini dilakukan atas dasar tinjauan terhadap penelitian serupa yang telah dilakukan untuk dijadikan sebagai referensi. Penelitian terdahulu yang diambil merupakan penelitian yang berkaitan dengan tekanan membran dan kemiringan *spacer* pada membran mikrofiltrasi. Hasil penelitian terdahulu mengenai tekanan membran seperti pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Tekanan Operasi Membran dan Pengaruhnya

No	Peneliti	Tipe dan material	Ukuran pori	Tekanan	Aliran	Pengaruh
1	Riduan, 2003	MF Kerucut	-	0.25, 0.5, 0.75,	Crossflow	Kenaikan tekanan sejalan dengan kenaikan flux dengan fluks tertinggi pada

No	Peneliti	Tipe dan material	Ukuran pori	Tekanan	Aliran	Pengaruh
		(Selulosa Asetat)		1.00, 1.25 bar		tekanan 1.25 bar, sedangkan rejeksi ss optimum terjadi pada tekanan 1 bar sebesar 65%. hal ini disebabkan karena adanya kompaksi pada membran yang menyebabkan berkurangnya ukuran efektif pori membran.
2	Ariyanti <i>et al.</i> , 2020	UF <i>Flat-sheet</i> (Selulosa Asetat)	1-100 nm	3, 5, 7 bar	Dead-end	Kinerja permeabilitas membran terbaik dalam penyisihan <i>E. coli</i> pada tekanan efektif 5 bar dengan fluks sebesar 37,25 L/m ² .jam.bar dengan sampel air PDAM kawasan Surabaya Timur
3	Thomassen <i>et al.</i> , 2005	MF Module (<i>Ceramic Titanium oxide</i>)	0,45 μm	0.2, 0.5, 2.5 bar	Crossflow	Dengan kecepatan crossflow 1,48 m/s removal dextrin tertinggi terjadi pada tekanan 2.5 bar sebesar 70% sedangkan tekanan optimal terjadi pada tekanan 0.5 bar dengan removal 62.5%. Peningkatan tekanan memberikan pengaruh terhadap peningkatan kecepatan crossflow, perpindahan massa dan kenaikan flux
4	Mahmud, 2005	UF <i>Flat-sheet</i> (Selulosa Asetat)	1-100 nm	1,2,3,4 bar	Crossflow	Nilai fluks optimum air <i>aquadest</i> tercapai dengan tekanan 3 bar sebesar 33 L/m ² .jam
5	Abadi <i>et al.</i> , 2011	MF Tubular (<i>Ceramic α-Al₂O₃</i>)	0.2 μm	0.75, 1.25, 1.75 bar	Crossflow	Tekanan operasi optimum terjadi pada tekanan 1.25 bar dengan nilai fluks permeat hingga 290 L/m ² .jam, removal TOC 95% dan resistensi terhadap <i>fouling</i> meningkat

Peninjauan terhadap hasil penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penambahan *spacer* serta kemiringan yang digunakan seperti pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Penambahan *Spacer* dan Pengaruhnya

No	Peneliti	Tipe Membran	Jenis <i>Spacers</i>	Material <i>Spacer</i>	Dimensi (WxDxT)	Sudut kontak	Pengaruh
1	Kerdi <i>et al.</i> , 2020	Module UF terendam	3D Heliks	Akrilik	6 cm x 15 cm x 1 mm	90°	Terjadi peningkatan flux sebesar 291% pada 3-heliks <i>spacer</i> pada kecepatan 0,182 m/s
2	Tan <i>et al.</i> , 2019	<i>Flat-sheet</i> MF terendam	3D Gelombang bergetar	Polyamide	10 cm x 10 cm x 0.3 mm	90°	Bentuk <i>spacer</i> gelombang dengan getaran 2 Hz lebih efisien dalam mencegah <i>fouling</i>
3	Rahmawati <i>et al.</i> , 2019	Module MF Terendam	3D Sirip	Akrilik	17.5 x 17.5 x 6.5 cm	70.9°	<i>Spacer</i> dengan sirip efektif mengurangi <i>foulant</i> dengan mendorong aliran udara menuju permukaan membran sehingga permeabilitas menjadi lebih tinggi dibanding <i>spacer</i> konvensional
4	Wu <i>et al.</i> , 2019	<i>Flat-sheet</i> MF terendam	1D (plat), 2D (plat dengan alur), 3D (gelombang)	Akrilik (1D 2D), Polyamide (3D)	10 cm x 10 cm x 0.3 mm (1D2D), 10 cm x 10 cm x 0.3 mm (3D)	90°	<i>Spacer</i> 3D dengan vibrasi mampu mencapai reduksi <i>fouling</i> pada membran 25-48%, laju pengotoran membran pada jarak 0,1 mm lebih kecil dibanding 1 mm
5	Fritzmam <i>et al.</i> , 2013	<i>Flat-sheet</i> MF terendam	3D double heliks	Filament	169 x 260 x (4,6,10) mm	90°	<i>Spacer</i> dapat meningkatkan fluks kritis hingga 100% dengan aliran crossflow sehingga dapat meminimalisir terjadinya <i>fouling</i>

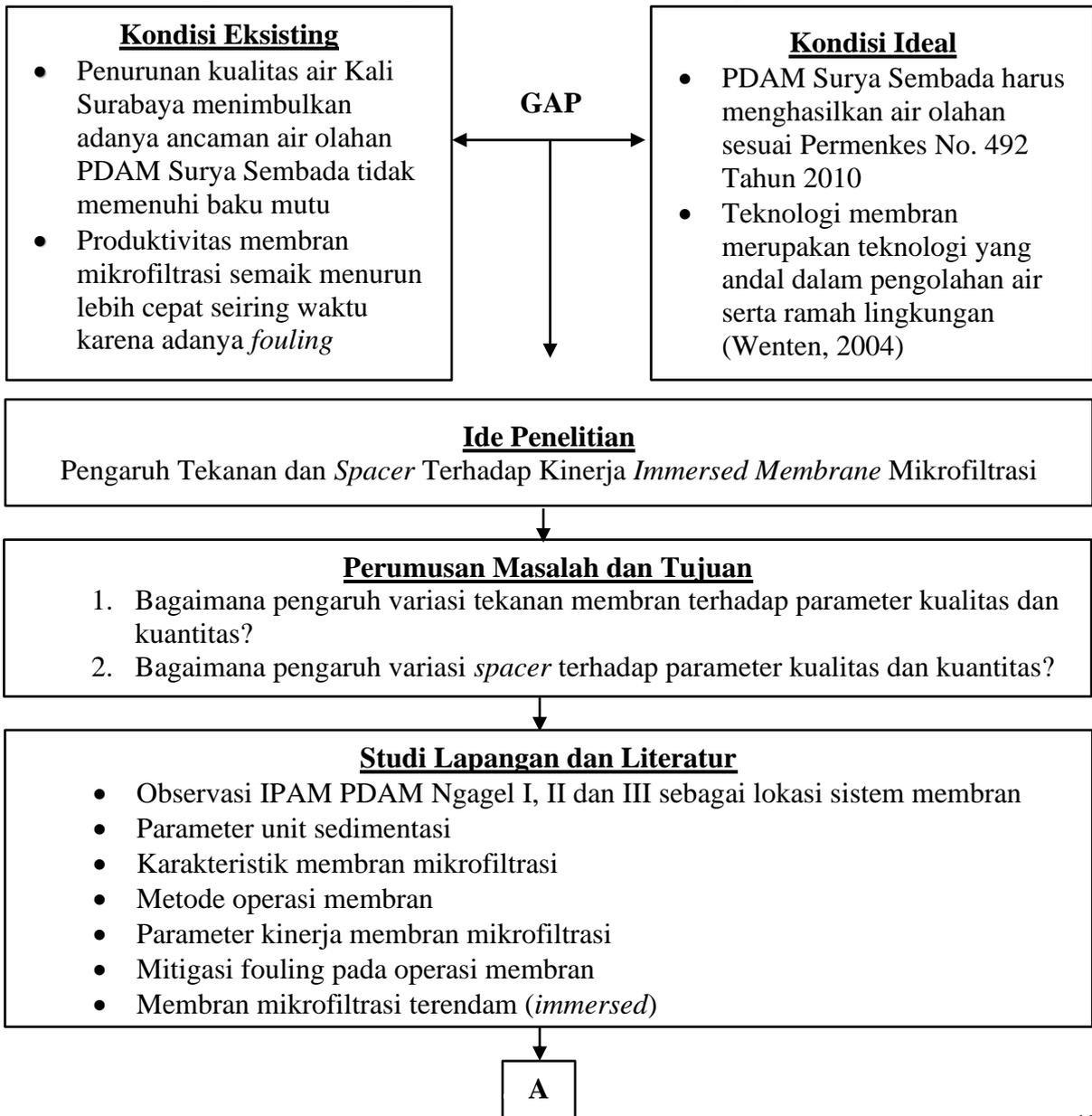
BAB 3 METODOLOGI

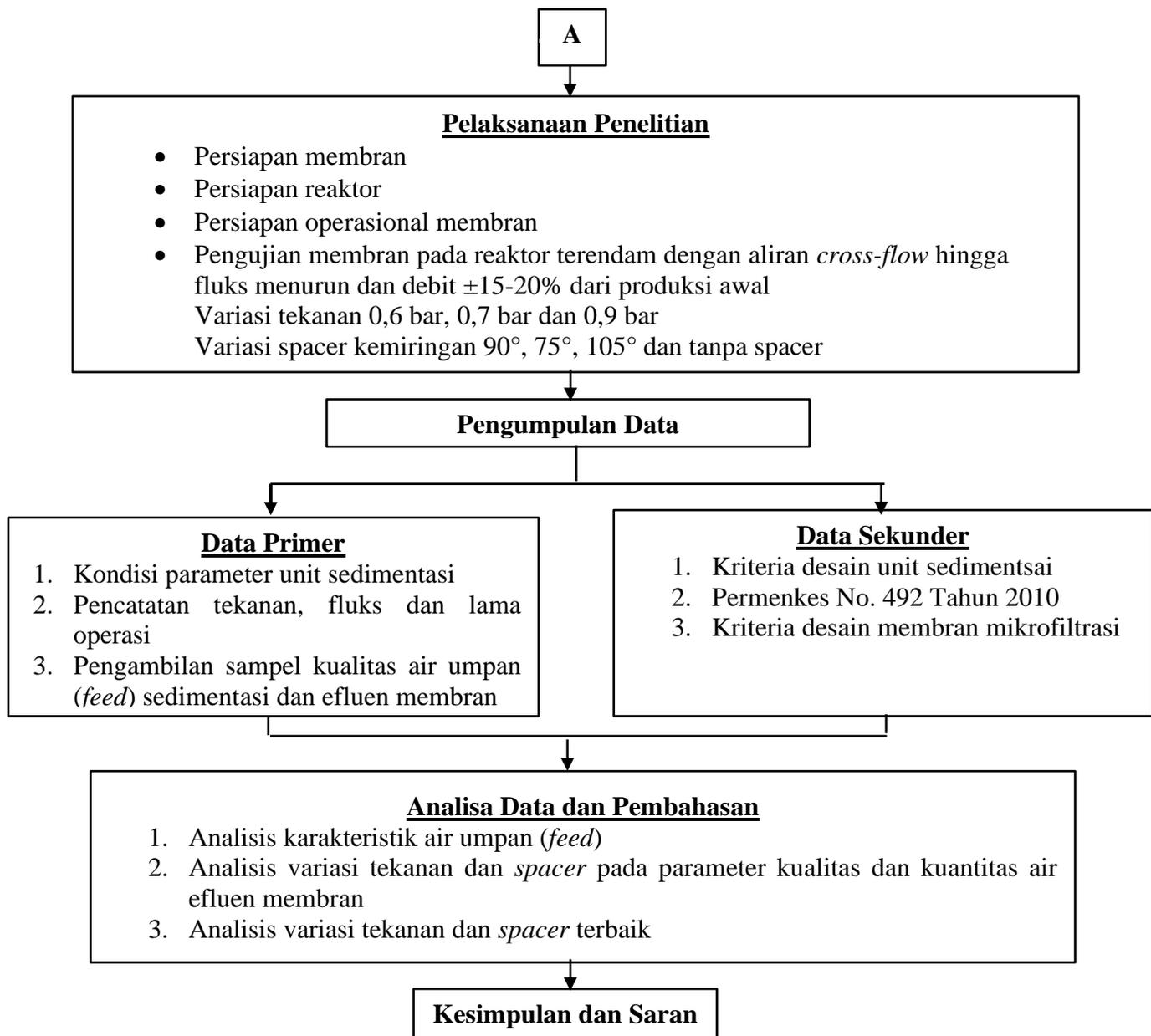
3.1 Umum

Metode penelitian disusun untuk mempermudah peneliti dalam melaksanakan tahapan penelitian kinerja *immersed membrane* mikrofiltrasi pada unit sedimentasi PDAM Ngagel III Surabaya. Variabel yang digunakan pada membran adalah tekanan dan kemiringan *spacer*. Pengujian kuantitas dan kualitas air hasil pengolahan dilakukan dengan menggunakan membran keramik mikrofiltrasi aliran *cross-flow*. Parameter kuantitas yang diuji meliputi nilai fluks, volume permeat dan lama operasi membran, sedangkan parameter kualitas meliputi nilai kekeruhan, TSS, mikroplastik, zat organik, total *coliform* dan *E. coli*.

3.2 Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian merupakan gambaran alur pemikiran yang digunakan untuk melaksanakan tahapan penelitian secara runtut berdasarkan permasalahan yang ada untuk mencapai tujuan penelitian. Adanya kerangka penelitian mampu meminimalisir terjadinya kesalahan dalam penelitian. Kerangka penelitian ini disusun seperti Gambar 3.1.





Gambar 3.1 Kerangka Penelitian

3.3 Ide Penelitian

Ide penelitian ini diidentifikasi berdasarkan kondisi eksisting pengolahan air minum IPAM PDAM Ngagel III Surabaya, dimana pengolahan air konvensional yang diterapkan tidak lagi efisien dalam mengolah air baku yang kualitasnya semakin menurun. Hal ini mendorong peneliti memodifikasi pengolahan konvensional dengan teknologi membran mikrofiltrasi sebagai alternatif untuk meningkatkan kualitas air yang dihasilkan sesuai persyaratan pada Peraturan Menteri Kesehatan RI No. 492 Tahun 2010. Namun, fenomena *fouling* yang terjadi pada membran memberikan penurunan terhadap kinerja membran seiring berjalannya waktu. Perlu adanya pengontrolan terhadap fenomena *fouling* untuk menjaga kinerja membran agar tetap stabil. Oleh karena itu, dilakukan penelitian terhadap pengaruh tekanan dan *spacer* terhadap kinerja *immersed membrane* mikrofiltrasi.

3.4 Studi Lapangan dan Literatur

Studi lapangan dilakukan sebagai observasi awal pada IPAM PDAM Ngagel I, II, dan III Surabaya agar peneliti memperoleh gambaran mengenai sistem pengolahan air yang ada dan

bagaimana teknologi membran akan diimplementasikan di lapangan. IPAM PDAM Ngagel I melakukan pengolahan air menggunakan unit *clearator* berbentuk *circular* sebelum masuk menuju filter. Unit *clearator* yang diterapkan memiliki *tube settler* yang berjarak 33 cm dari atas muka air. Ketika unit beroperasi setiap hari terjadi penurunan level air dengan ketinggian yang fluktuatif selama 30 menit. Adanya hal ini menyebabkan *flat-sheet membrane* tidak dapat diaplikasikan secara terendam selama operasi berlangsung. *Flat-sheet membrane* mikrofiltrasi yang diuji pada penelitian ini harus terendam secara menyeluruh agar tidak mempengaruhi proses filtrasi yang berlangsung.



Gambar 3.2 Unit *Clearator* IPAM PDAM Ngagel I
Sumber: Dokumentasi

IPAM PDAM Ngagel II menerapkan unit *accelerator* berbentuk *circular* sebelum air diolah menuju filter. Unit ini menerapkan *plat settler* didalamnya yang berjarak 125 cm dari muka air. Namun, ketika unit sedang beroperasi terjadi penurunan level air hingga *plate settler* tidak terendam. Kondisi ini akan berlangsung selama 30 menit. Hal ini dapat mempengaruhi kondisi operasi pada *flat-sheet membrane* apabila diterapkan pada unit *accelerator* IPAM PDAM Ngagel II karena tidak terendam secara menyeluruh pada waktu tertentu.



Gambar 3.3 Unit *Accelerator* IPAM PDAM Ngagel II
Sumber: Dokumentasi

Unit pengolahan air minum yang diterapkan pada IPAM Ngagel III sebelum menuju filter adalah unit sedimentasi konvensional. Unit ini tidak menerapkan *settler* dan tidak terjadi penurunan level air setiap hari selama operasi. Penurunan level air terjadi sebulan sekali ketika unit sedimentasi dikuras. Berdasarkan hasil observasi kondisi lapangan yang telah dilakukan dan pertimbangan yang ada, maka *immersed membrane* mampu diaplikasikan dan diuji pada unit sedimentasi IPAM PDAM Ngagel III.



Gambar 3.4 Unit Sedimentasi IPAM PDAM Ngagel III
Sumber: Dokumentasi

Studi literatur dilakukan untuk memperoleh teori-teori yang menunjang proses pemecahan masalah selama penelitian ini berlangsung. Konsep yang harus dipahami pada penelitian ini meliputi parameter desain unit sedimentasi, karakteristik membran mikrofiltrasi, metode operasi membran, parameter yang mempengaruhi kinerja membran, tekanan sebagai gaya dorong (*pressure driven*), penambahan *spacer*, serta parameter kuantitas dan kualitas yang akan diteliti. Dengan demikian proses analisa data dan perancangan alat telah didasarkan pada metode yang baik dan benar.

3.5 Persiapan Penelitian

Pada tahap ini, dilakukan persiapan alat dan bahan yang dibutuhkan dalam pembuatan reaktor, persiapan alat operasional pada proses pengolahan, serta persiapan peralatan yang dibutuhkan untuk analisis sampel *feed* dan *permeate*.

3.5.1 Persiapan Membran

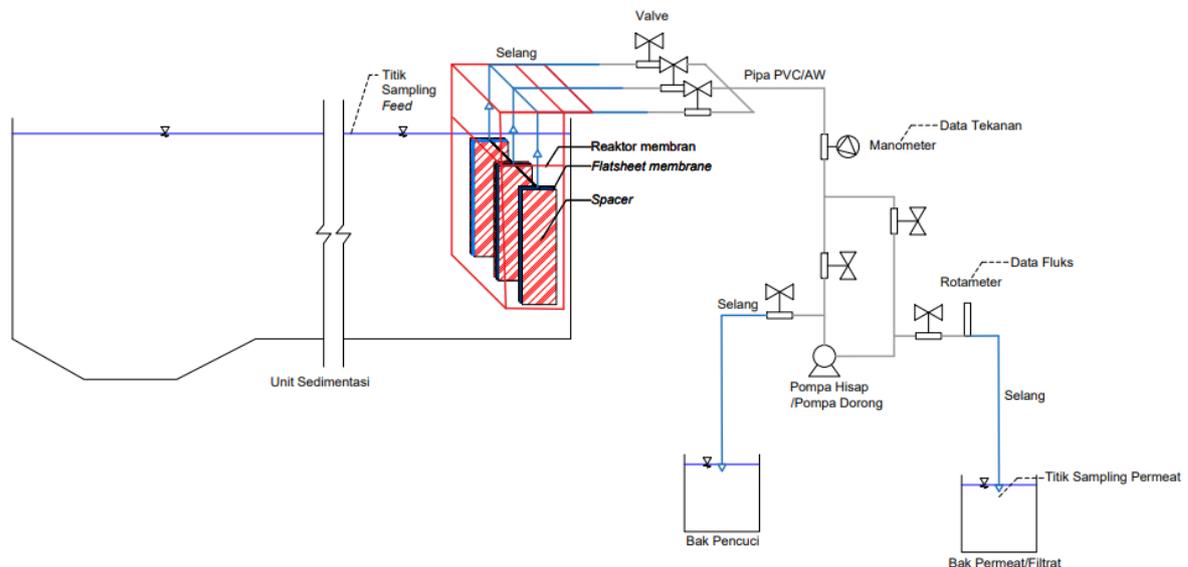
Penelitian ini menggunakan membran mikrofiltrasi dengan ukuran pori $0,05\ \mu\text{m}$ berbahan keramik ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) sebagai objek yang diuji. Konfigurasi membran yang digunakan berbentuk *flat-sheet* dengan luas efektif $0,15\ \text{m}^2$. Pelaksanaan penelitian ini membutuhkan 4 buah membran *flat-sheet* dan 1 sebagai cadangan. Sebelum pengambilan data dilakukan pengecekan awal fluks dan tekanan membran pada Workshop Departemen Teknik Lingkungan ITS. Pengecekan ini dilakukan untuk memastikan tidak ada kecacatan pada produk membran serta memastikan membran dapat berfungsi dengan baik. Spesifikasi membran yang digunakan seperti pada Lampiran 3. Pengecekan membran dilakukan menggunakan air bersih. Berdasarkan pengukuran tekanan dan debit yang dihasilkan seperti pada Gambar 3.5 diketahui bahwa tekanan maksimum yang diperoleh dengan kondisi valve terbuka penuh sebesar 0,7 bar dan debit produk yang dihasilkan sebesar 8,5 L/menit. Pengujian awal ini tidak dapat digunakan sebagai tolak ukur kinerja membran di lapangan. Hal ini dikarenakan kondisi membran pada pengujian direndam pada bak dengan level air yang lebih tinggi dibandingkan dengan level air pada pipa. Sehingga tekanan (*head*) yang terukur dapat berbeda dengan kondisi di lapangan.



Gambar 3.5 Pengecekan Tekanan dan Debit Membran

3.5.2 Persiapan Reaktor

Reaktor membran pada penelitian ini dirancang untuk mempermudah peneliti dalam memperoleh data terkait pengaruh tekanan membran dan kemiringan *spacer* terhadap kinerja *immersed membrane* mikrofiltrasi ketika dioperasikan di lapangan. Skema perancangan reaktor *Immersed membrane* mikrofiltrasi dikonstruksikan seperti pada Gambar 3.6.



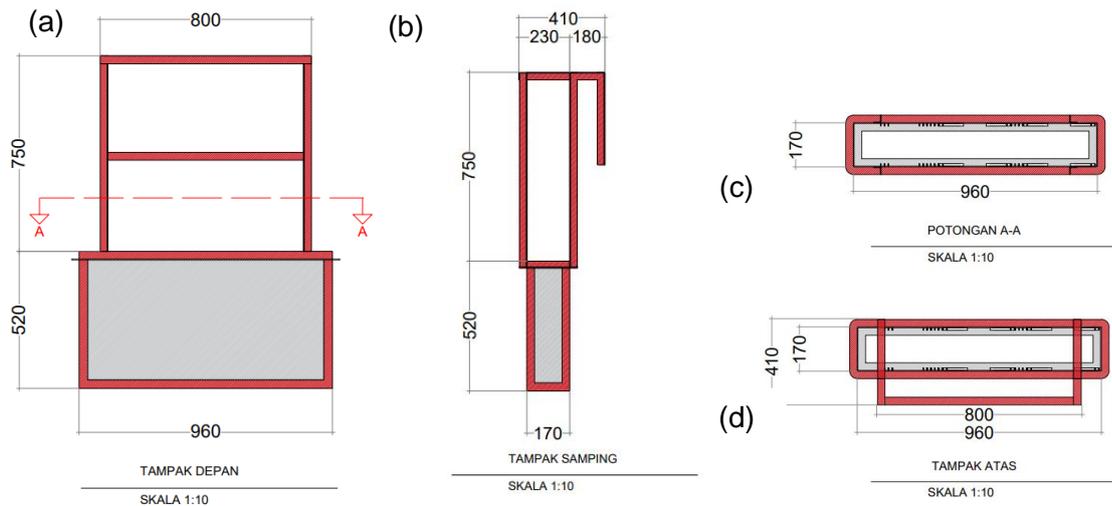
Gambar 3.6 Skema Reaktor *Immersed Membrane* Mikrofiltrasi

Reaktor membran yang digunakan dalam penelitian ini tersusun dari 2 bagian, yaitu bagian terendam dan tidak terendam.

1. Reaktor terendam

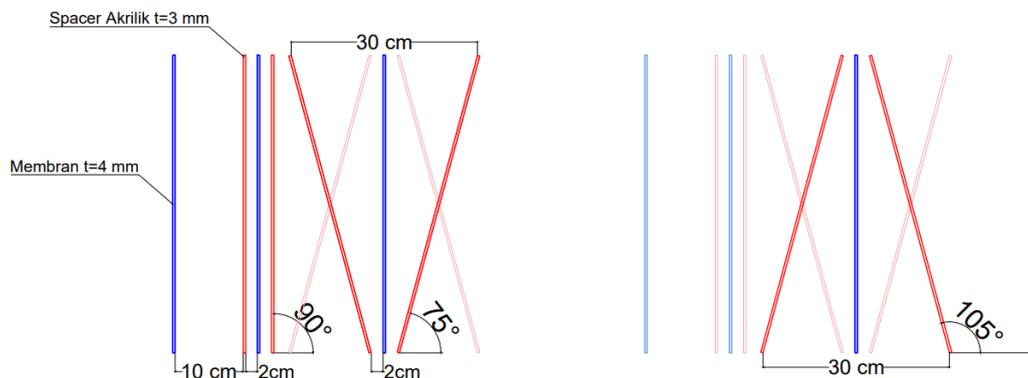
Bagian reaktor yang terendam didesain untuk aliran *cross-flow* dan diletakkan secara terendam pada bak sedimentasi IPAM PDAM Ngagel III. Reaktor ini berbentuk *rectangular* yang terbuat dari bahan akrilik dengan tebal 3 mm sebagai dinding reaktor dan dikombinasikan dengan rangka menggunakan besi sehingga reaktor dapat diletakkan menggantung pada dinding bak sedimentasi. Pada sisi bagian dalam reaktor digunakan sistem slot untuk menampung 3 buah *flat-sheet membrane* dan 4 buah *spacer* berbahan akrilik dengan ketebalan 3 mm. Berikut dimensi reaktor terendam yang digunakan:

- Panjang reaktor = 90 cm
- Lebar reaktor = 17 cm
- Tinggi reaktor = 52 cm
- Tinggi rangka besi = 75 cm



Gambar 3.7 Reaktor Membran Terendam (a) Tampak depan; (b) Tampak Samping; (c) Potongan A-A; dan (d) Tampak Atas

Reaktor ini dilengkapi slot berbahan akrilik yang berfungsi sebagai penyangga membran dan *spacer* ketika beroperasi. Slot ini dirancang berdasarkan skema kemiringan membran yang akan diuji. Pengujian kemiringan pada *spacer* dilakukan dengan variasi kemiringan 90° , 75° , 105° dan tanpa *spacer* seperti skema pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Skema Kemiringan *Spacer*

Berdasarkan kapasitas slot membran pada reaktor terendam, variasi kemiringan *spacer* 105° diuji secara terpisah dengan kondisi membran yang berbeda. Kualitas air umpan pada kondisi kemiringan 105° diuji kembali agar hasil analisis kinerja membran pada kondisi ini representatif.

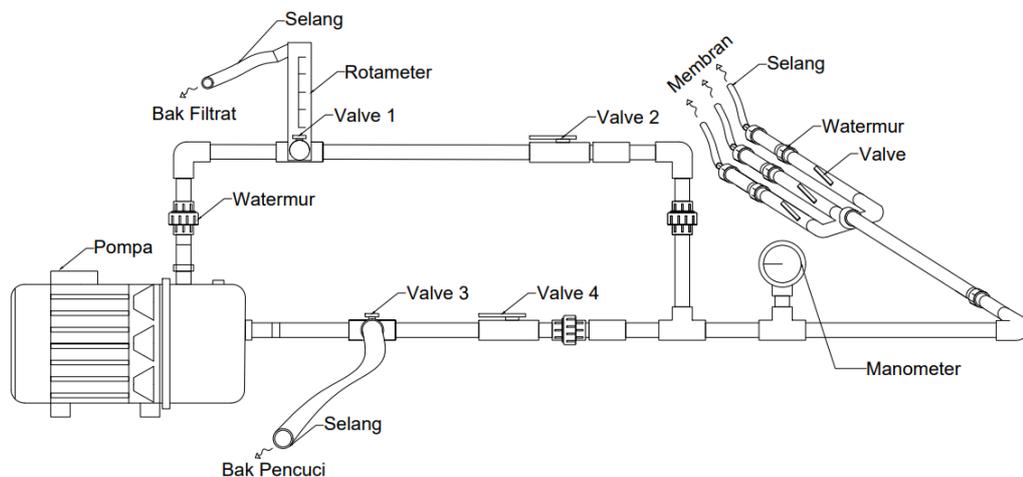
2. Reaktor tidak terendam

Bagian reaktor yang tidak terendam merupakan pengatur aliran dan tekanan yang dihubungkan dengan outlet membran agar dapat diambil sampel hasil pengolahan. Reaktor ini diletakkan pada jalan operasi antara outlet bak sedimentasi dan kanal III. Reaktor tersebut dibuat dengan menggunakan bahan pipa PVC, selang, *water mur*, manometer, rotameter, valve, klem serta aksesoris perpipaan seperti *tee*, *bend 90^\circ* dan *shock*. Manometer pada reaktor berfungsi untuk mengamati tekanan hisap yang terjadi pada saat operasional.

Rotameter pada outlet berfungsi untuk melihat debit efluen yang mampu dihasilkan oleh membran. Terdapat 3 cabang valve di dekat membran yang berfungsi membuka dan menutup aliran air pada masing-masing membran di dalam reaktor. Selain itu, terdapat 4 valve yang berada di dekat pompa yaitu valve 1, valve 2, valve 3, dan valve 4 yang masing-masing berfungsi sebagai berikut

- Valve 1 = Berfungsi membuka dan menutup aliran dorong pada outlet menuju bak filtrat
- Valve 2 = Berfungsi membuka dan menutup aliran dorong menuju membran
- Valve 3 = Berfungsi membuka dan menutup aliran hisap dari bak pencuci
- Valve 4 = Berfungsi membuka dan menutup aliran hisap dari membran

Keempat valve tersebut difungsikan sesuai dengan waktu operasionalnya. Pada saat filtrasi berlangsung valve 1 dan valve 4 dibuka sedangkan valve 2 dan 3 ditutup. Pada saat backwash valve 1 dan 4 ditutup dan valve 2 dan 3 dibuka.



Gambar 3.9 Reaktor Tidak Terendam

3.5.3 Persiapan Operasional

Membran keramik ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) mikrofiltrasi *flat-sheet* (Jiangxi Dasen Tech., China) dengan luas efektif $0,15\text{ m}^2$ dan ukuran pori $0,05\text{ }\mu\text{m}$ dioperasikan secara terendam sebanyak 4 buah menggunakan aliran *cross-flow* dengan kondisi variasi *spacer* yang berbeda. *Feed* berasal dari bak sedimentasi dihisap melalui membran menggunakan pompa hisap yang tekanannya diatur melalui *valve*. Operasional membran dilakukan dengan tekanan konstan pada tiap variasi dan dikontrol menggunakan manometer. Perubahan fluks permeat diamati setiap jam menggunakan rotameter serta diukur secara manual menggunakan gelas ukur selama 1 menit. Efluen permeat ditampung sementara pada bak permeat/ filtrat untuk digunakan kembali sebagai pelarut atau air pencucian. Efluen permeat yang tidak dianalisis akan dialirkan kembali pada outlet bak sedimentasi untuk menjaga level muka air pada bak sedimentasi. Plat *spacer* dengan material akrilik dipasang pada kedua sisi permukaan membran untuk mengurangi *fouling* dan mempertahankan fluks (Rahmawati *et al.*, 2021). Setelah proses filtrasi, dilakukan pencucian (*backwash*) pada membran menggunakan air pencuci yang dipompakan menuju membran untuk menghilangkan pengotoran pada permukaan membran sebelum membran digunakan kembali. Tahapan operasional membran dapat dilakukan seperti pada diagram alir pada Lampiran 4. Ketika operasional membran dibutuhkan peralatan pendukung sebagai berikut:

1. Bak Filtrat
Merupakan wadah yang terbuat dari plastik, yang berfungsi sebagai penampung efluen hasil pengolahan sebelum digunakan kembali sebagai bahan pelarut untuk pencucian membran
2. Bak Pencuci
Merupakan wadah yang terbuat dari plastik, yang berfungsi menampung air pencuci yang dibutuhkan untuk pencucian membran
3. Pompa hisap
Berfungsi menghisap air melalui membran menuju bak filtrat serta mendorong air pencuci dari bak pencuci menuju membran
4. *Timer*
Berfungsi mengukur lama waktu operasi dan menghitung debit secara manual
5. Gelas ukur
Berfungsi mengukur volume efluen yang keluar sebagai debit secara manual
6. Gelas beaker
Berfungsi sebagai wadah penampung sampel sementara untuk diukur debit serta diuji parameternya.
7. Kabel olor
Sebagai penghubung sumber listrik terdekat dengan reaktor

3.6 Pelaksanaan Penelitian

Membran mikrofiltrasi *flat-sheet* diletakkan pada slot reaktor terendam dengan aliran *cross-flow* sebanyak 3 buah. Aliran *cross-flow* pada reaktor terjadi ketika *feed* masuk melalui bagian bawah reaktor menuju ke atas membran. Penerapan aliran *cross-flow* mampu meminimalisir penumpukan partikel pada permukaan membran sehingga dapat mencegah terjadinya fouling dengan cepat (Wang *et al.*, 2011). Selanjutnya dipasang *spacer* akrilik sesuai dengan variasi kondisi penelitian pada slot di sisi membran. Penambahan *spacer* pada sisi membran diharapkan mampu meningkatkan permeabilitas pada membran sehingga fluks yang dihasilkan tetap stabil (Rahmawati *et al.*, 2019). Setelah *spacer* terpasang, reaktor membran direndam dengan cara menggantungkan sisi atas rangka besi pada dinding bak sedimentasi. Posisi membran di dalam reaktor dipastikan terendam sehingga air dapat dihisap serta meminimalisir masuknya udara pada selang reaktor. Posisi reaktor berjarak 30 cm dari dasar bak sedimentasi. Ketiga membran dihubungkan pada reaktor tidak terendam dengan kondisi ketiga valve membran terbuka sehingga air dapat terhisap naik menuju outlet reaktor. Pada reaktor tidak terendam disediakan kabel olor yang berfungsi sebagai penghubung reaktor dengan sumber listrik terdekat untuk memberikan daya pada pompa. Pompa yang digunakan merupakan pompa Moswell *Aqua-jet* 100 dengan head hisap 11 m dan head dorong 34 m.

Ketika awal pengoperasian reaktor, disiapkan air bersih pada bak pencuci sebagai *start-up* awal pompa. *Start-up* awal pompa dilakukan dengan membuka valve 1 dan 3 sehingga dipastikan pompa mampu menghisap air yang ada menuju ke outlet untuk ditampung di bak filtrat. Setelah aliran air lancar, valve 3 ditutup perlahan bersamaan dengan dibukanya valve 4 sehingga tekanan hisap yang ada pada pipa secara perlahan akan beralih menghisap dari arah membran. Valve 3 dan 4 dibuka dan ditutup secara perlahan hingga tekanan hisap yang terbaca pada manometer stabil. Setelah tekanan hisap stabil diukur fluks awal membrane secara manual kemudian air hasil pengolahan akan ditampung pada bak filtrat untuk memenuhi kebutuhan pencucian membran dan *start-up* kondisi berikutnya. Pengukuran fluks dilakukan pada setiap jam selama proses filtrasi berlangsung. Pengujian kinerja membran dilakukan hingga terjadi penurunan tekanan dan atau apabila debit efluen yang dihasilkan $\pm 15-20\%$ debit awal atau debit < 100 mL. Penelitian ini dilakukan secara *intermittent on/off* pompa. Proses filtrasi dihentikan

ketika pompa dan air efluen yang dihasilkan panas. Hal ini dilakukan untuk menjaga kinerja pompa yang digunakan selama operasional agar tetap stabil. Proses filtrasi dilanjutkan dengan kondisi penelitian yang sama ketika pompa sudah dingin. Variasi kondisi penelitian yang dilakukan seperti pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Kondisi Penelitian

No	Komponen	Membrane 1	Membrane 2	Membrane 3	Membrane 4
1	Kemiringan <i>Spacer</i>	Tanpa <i>Spacer</i>	90°	75°	105°
2	Tekanan hisap	0,6 bar	0,6 bar	0,6 bar	0,6 bar
		0,7 bar	0,7 bar	0,7 bar	0,7 bar
		0,9 bar	0,9 bar	0,9 bar	0,9 bar
3	Periode pengamatan flux	Setiap jam	Setiap jam	Setiap jam	Setiap jam
4	Periode pengambilan sampel filtrat	di jam terakhir percobaan			
5	Lama operasi	sd. Fluks turun	sd. Fluks turun	sd. Fluks turun	sd. Fluks turun

Ketika awal pengoperasian, Menurut Redjeki, (2011) perlu diperhatikan beberapa hal untuk meminimalisir terjadinya *error* dalam penelitian ini yaitu:

1. Memastikan tidak ada kebocoran pada reaktor, apabila terjadi kebocoran segera perbaiki titik kebocoran yang terdeteksi
2. Memastikan sistem perpipaan dan membran terpasang dengan baik
3. Memastikan peralatan mekanikal dan elektrik seperti pompa dan kabel olor telah terhubung dengan sumber listrik dan berfungsi dengan baik
4. Memastikan tidak ada gelembung udara pada reaktor membran sehingga mempengaruhi kinerja membran
5. Melakukan *trial* dan *error* sebelum pelaksanaan kondisi penelitian untuk data sebenarnya sehingga dapat mengevaluasi kesalahan maupun kekurangan dalam pelaksanaan penelitian.

Urutan pekerjaan selama pelaksanaan penelitian dilakukan seperti pada Lampiran. 4.

3.7 Analisis Sampel

Sampel kinerja membran yang diuji terdiri dari sampel hasil efluen membran dan *feed* yang berasal dari bak sedimentasi. Pengambilan sampel dilakukan pada saat jam terakhir percobaan berdasarkan SNI air permukaan No. 6989.57:2008. Selama 6 kali *running* dengan variasi tekanan dan *spacer* total sampel yang diambil sebanyak 18 sampel yang terdiri dari 12 sampel membran dan 6 sampel *feed*. Pengambilan sampel dilakukan menggunakan wadah yang sesuai dengan peruntukan pengujian sampel. Pengujian sampel hasil efluen membran dilakukan di Laboratorium Teknologi Pengolahan Air, Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan, ITS dan Laboratorium PDAM Ngagel II Surabaya. Parameter yang diuji pada sampel antara lain nilai kekeruhan, TSS, mikroplastik, total *coliform*, *E. coli*, zat organik. Pengujian parameter dilakukan berdasarkan standar yang berlaku seperti pada Tabel 3.2. Prosedur pengujian parameter sampel secara spesifik dapat dilihat pada Lampiran A

Tabel 3.2 Parameter dan Metode Pengujian Kualitas Air

No.	Parameter	Metode	Standar Acuan
1.	Nilai Kekeruhan	Turbidimeter	(Pramesti & Puspikawati, 2020)
2.	TSS	Gravimetri	SNI 06-6989.3:2004
3.	Mikroplastik	Wet Peroxide Oxidation (WPO)	NOAA Microplastic Methods Manual
4.	Total <i>coliform</i> dan <i>E. coli</i>	IDEXX Colilert	Standard Methods 9223
5.	Zat organik	Nilai Permanganat	SNI 06-6989.22-2004

3.8 Analisis Data dan Pembahasan

Analisis data dilakukan berdasarkan hasil uji sampel setiap parameter pada variasi kondisi penelitian membran mikrofiltrasi terendam. Analisis data dilakukan untuk mengetahui tekanan optimal serta kemiringan *spacer* yang optimal dalam rejeksi pengotoran pada membran. Pengolahan data dilakukan menggunakan bantuan *software microsoft excel* untuk menyajikan hasil analisis dalam bentuk tabel dan grafik pada laporan penelitian. Berdasarkan hasil pengolahan data, dilakukan perbandingan antara parameter hasil analisis *feed* dan analisis sampel membran pada jam terakhir sehingga dapat diketahui persentase peningkatan kinerja membran terhadap setiap variabel yang diuji. Data-data yang diperoleh pada penelitian antara lain:

1. Analisis kecepatan aliran air pada bak sedimentasi 4b IPAM PDAM Ngagel III Surabaya berdasarkan hasil pengumpulan data dimensi pada unit sedimentasi IPAM PDAM Ngagel III Surabaya
2. Analisis uji kualitas dan kuantitas air hasil pengolahan yang dibandingkan dengan sampel *feed* berdasarkan grafik
3. Analisis variasi tekanan dan *spacer* terbaik

3.9 Penarikan Kesimpulan dan Saran

Setelah memperoleh hasil pengolahan data dan analisa data, maka ditarik kesimpulan sebagai ringkasan akhir yang mampu menjawab tujuan penelitian yang dilakukan. Kemudian diberikan saran dan rekomendasi pada pihak PDAM Ngagel III Surabaya maupun pihak terkait lainnya sebagai perbaikan dan pengembangan pada penelitian mendatang.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini akan membahas hasil penelitian serta analisis mengenai “Pengaruh Tekanan dan *Spacer* Terhadap Kinerja *Immersed Membrane* Mikrofiltrasi”. Variabel tekanan dalam penelitian ini terdiri dari tiga variasi tekanan hisap yaitu, 0,6 bar, 0,7 bar, dan 0,9 bar. Variabel *spacer* dalam penelitian ini terdiri dari kemiringan *spacer* 90°, kemiringan *spacer* 75°, kemiringan *spacer* 105° dan tanpa *spacer*. Hasil penelitian ini diperoleh berdasarkan hasil data sebenarnya pada pelaksanaan penelitian setelah dilakukan *trial* dan *error* pada perancangan reaktor maupun kondisi operasi membran yang terjadi dilapangan. *Trial* dan *error* pada perancangan reaktor dilakukan untuk memudahkan peneliti dalam proses *start-up* pemompaan, menciptakan sirkulasi aliran yang lancar serta mendapatkan tekanan operasi yang stabil selama penelitian berlangsung. Sedangkan *trial* dan *error* pada kondisi operasi membran dilakukan untuk mendapatkan data tekanan operasi dan lama operasi yang representatif selama operasi membran. Pembahasan hasil dan analisis dalam penelitian ini meliputi, analisis karakteristik air umpan (*feed*), analisis pengaruh tekanan dan analisis pengaruh *spacer* terhadap kinerja *immersed membrane* mikrofiltrasi.

4.1 Analisis Karakteristik Air Umpan (*Feed*)

Karakteristik air umpan (*feed*) yang masuk pada saat operasional membran merupakan salah satu hal yang mempengaruhi terjadinya fenomena *fouling*, dimana fenomena tersebut merupakan faktor yang mempengaruhi kinerja membran (Wang *et al.*, 2011). Air umpan (*feed*) yang masuk menuju membran berasal dari unit sedimentasi IPAM PDAM Ngagel III Surabaya pada bak nomor 4b. Sebelum unit sedimentasi, air telah melalui proses *pre-treatment* dengan koagulasi dan flokulasi. Konvensional *pre-treatment* berupa koagulasi-flokulasi pada IPAM PDAM Ngagel III mampu dikombinasikan dengan teknologi membran untuk dapat meningkatkan kualitas air umpan (*feed*) sebelum menuju membran. Adanya *pre-treatment* sebelum operasi membran telah terbukti mampu meminimalisir terjadinya fenomena *fouling* yang cepat sehingga masa pakai membran menjadi lebih lama serta kebutuhan instalasi membran menjadi lebih sedikit (Goh *et al.*, 2018).

Pengambilan sampel kualitas air umpan sebagai uji karakteristik awal sebelum proses filtrasi dengan membran dilakukan bersamaan pada setiap jam terakhir variasi percobaan. Hal ini dilakukan untuk meminimalisir adanya perbedaan karakteristik yang fluktuatif pada bak sedimentasi nomor 4b dengan efluen yang dihasilkan oleh membran. Total sampel yang diperoleh selama penelitian sebanyak 6 sampel. Pengambilan sampel *feed* pada bak 4b dilakukan menggunakan botol PET 1,5 liter, botol kaca 500 mL, dan botol Duran steril 100 mL. Hasil uji karakteristik air umpan (*feed*) yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 4.1. Sampel *feed* 1 merupakan sampel kualitas *feed* yang diambil pada kondisi *running* 1, 2, 3 untuk kondisi membran M1 (tanpa *spacer*), M2 (kemiringan *spacer* 90°), dan M3 (kemiringan 75°). Sampel *feed* 2 merupakan sampel kualitas *feed* yang diambil pada kondisi *running* 4, 5, 6 untuk kondisi membran M4 (kemiringan *spacer* 105°).

Tabel 4.1 Hasil Uji Karakteristik Kualitas Air Umpan (*Feed*)

Parameter	Satuan	Sampel <i>Feed</i>		Baku Mutu*
		1	2	
Nilai Kekeruhan	NTU	5,64	7,91	5
		10,43	7,61	
		10,45	10,70	
TSS	mg/L	2,00	5,00	-

Parameter	Satuan	Sampel <i>Feed</i>		Baku Mutu*
		1	2	
		8,00	19,00	
		7,00	22,50	
Zat Organik	mg/L KMnO ₄	21,33	13,75	10
		20,38	11,69	
		17,85	13,59	
Mikroplastik	Partikel/500mL	27,00	5,00	-
		11,00	13,00	
		12,00	5,00	
Total <i>Coliform</i>	MPN/100mL	20460,00	24195,00	0
		17200,00	24195,00	
		32820,00	5200,00	
<i>E. coli</i>	MPN/100mL	1340,00	517,20	0
		410,00	24195,00	
		2310,00	310,00	

*Peraturan Menteri Kesehatan RI No. 492 Tahun 2010

Pengujian kualitas air umpan (*feed*) dilakukan agar didapat perbandingan nilai rejeksi (%R) yang dihasilkan oleh membran mikrofiltrasi pada kondisi penelitian yang diterapkan di lapangan. Berdasarkan hasil analisis kualitas air umpan (*feed*) sebelum proses mikrofiltrasi dibandingkan dengan Peraturan Menteri Kesehatan RI No. 492 Tahun 2010 diketahui bahwa parameter nilai kekeruhan, zat organik, total *coliform*, dan *E. coli* pada setiap sampel masih melebihi baku mutu yang ditetapkan. Parameter mikroplastik pada air umpan (*feed*) memiliki nilai konsentrasi 27 partikel/500mL, 11 partikel/500mL, 12 partikel/500mL, 5 partikel/500mL, 13 partikel/500mL, 5 partikel/500mL. TSS pada air umpan memiliki nilai konsentrasi rata-rata 2 mg/L, 8 mg/L, 7 mg/L, 5 mg/L, 19 mg/L, 22 mg/L. Dengan demikian perlu adanya proses pengolahan lebih lanjut agar kualitas air yang dihasilkan dapat sesuai dengan baku mutu yang ditetapkan.

Pada unit sedimentasi terjadi proses pengendapan partikel flok secara gravitasi. Proses pengikatan flok-flok untuk dapat mengendap sangat dipengaruhi oleh kondisi aliran yang terjadi. Agar flok yang dihasilkan tidak terpecah perlu dihitung bilangan Reynold (NRe) untuk mengetahui kondisi aliran yang terjadi pada bak sedimentasi (Ary & Indaryanto, 2017). Pada penelitian ini, kuantitas awal air umpan (*feed*) didapatkan dengan melakukan analisis data sekunder berupa kriteria desain pada IPAM PDAM Ngagel III.

- Panjang (P) = 95 meter
- Lebar (L) = 28 meter
- Kedalaman (H) = 1,5-3 meter (Rata-rata 1,5 m)
- Freeboard = 0,2 meter
- Debit (Q) = 7,2 m³/hari
- Waktu tinggal (td) = 5 jam = 18000 detik
- Kecepatan Horizontal (Vh) = $\frac{p}{td}$
 $= \frac{95 \text{ m}}{18000 \text{ detik}}$
 $= 0,000527 \text{ m/detik}$
- Jari-jari Hidrolis (R) = $\frac{L \times H}{L+2H}$

- Nre

$$\begin{aligned}
 &= \frac{28 \times 1,5}{28 + 2(1,5)} \\
 &= 1,35 \\
 &= \frac{V_h \times R}{v} \\
 &= \frac{0,00527 \frac{\text{m}}{\text{detik}} \times 1,35}{0,8039 \times 10^{-6}} \\
 &= 8.850 > 2.000 \text{ (Tidak Memenuhi)}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan parameter desain yang ada pada unit sedimentasi, diketahui bahwa nilai bilangan Reynold pada bak sedimentasi masih dikategorikan turbulen. Hal ini menunjukkan bahwa kemungkinan flok untuk terpecah kembali sangat tinggi, sehingga dapat memberikan pengaruh terhadap konsentrasi partikel tersuspensi (TSS) dan kekeruhan pada air umpan yang masuk menuju membran (Hidayah & Karnaningroem, 2010).

4.2 Analisis Pengaruh Tekanan Terhadap Kinerja *Immersed Membrane* Mikrofiltrasi Pada Unit Sedimentasi IPAM PDAM Ngagel III

Penelitian ini menguji pengaruh tekanan operasi membran terhadap kinerja membran mikrofiltrasi berbahan keramik secara terendam pada unit sedimentasi IPAM PDAM Ngagel III. Tekanan merupakan salah satu parameter pada operasi membran yang berperan dalam transport massa pada membran (Wang *et al.*, 2011). Pengujian pengaruh tekanan operasi pada membran dimaksudkan sebagai upaya mitigasi terjadinya fenomena fouling pada membran secara cepat dan upaya mempertahankan kinerja membran mikrofiltrasi terendam secara maksimal. Pengujian *immersed membrane* dioperasikan dengan tekanan hisap oleh pompa Moswell Aqua Jet 100 (1 HP) untuk menyalurkan air menuju outlet reaktor. Spesifikasi pompa yang digunakan dapat dilihat pada Lampiran 3.

Tekanan yang digunakan pada membran mikrofiltrasi terendam pada umumnya kurang dari 2 bar. Penggunaan tekanan yang rendah menjadikan konsumsi energi yang dibutuhkan cenderung lebih rendah dibandingkan jenis membran lainnya (Wenten, 2004). Pengaturan tekanan negatif dan aliran pada membran dilakukan menggunakan *ball valve* dan dikontrol pada manometer. Namun, pada kondisi lapangan penggunaan *ball valve* hanya mampu mengatur aliran pada reaktor dan kurang efektif sebagai pengatur tekanan pada membran. Hal tersebut dipengaruhi oleh jenis pompa dan lokasi penempatan pompa. Perbedaan ketinggian pada pompa dengan membran terendam yang cukup jauh memberikan dampak terhadap *suction head* pada pompa yang mana menyebabkan tekanan hisap pompa menjadi menurun. Namun, apabila penempatan pompa sejajar atau lebih rendah dibanding posisi perendaman membran tekanan hisap pada pompa menjadi kuat. Pompa air yang digunakan pada penelitian ini, dengan daya hisap 11 m memiliki fungsi utama untuk mendorong aliran, sehingga tekanan negatif pada membran tidak mampu dicapai secara *set-up*. *Set-up* awal tekanan negatif pada membran membutuhkan pompa membran khusus dengan sistem *pulsing* yang cocok untuk pengoprasian membran terendam. Dengan demikian tidak menimbulkan gelembung pada sirkulasi aliran dan tidak mudah panas.

Pada kondisi awal operasi ketika permukaan pori membran bersih, akan tercapai tekanan maksimum operasi yang mampu dicapai oleh membran. Ketika operasi berlangsung, partikel pengotor akan menyumbat pori membran sehingga tekanan pada *pressure gauge* akan mengalami penurunan mendekati tekanan *vacuum* (0 bar) yang berasal dari pompa sedangkan tekanan transmembran (TMP) akan mencapai titik maksimumnya (Sowmya *et al.*, 2020). Sehingga pada penelitian ini pengaturan tekanan negatif pada kondisi penelitian dilakukan secara alami berdasarkan penurunan gaya dorong tekanan (*pressure driven*) pada membran (Rahmawati *et al.*, 2021), dengan melakukan *set-up* awal tekanan maksimal (0,9 bar) yang dapat dicapai oleh membran kemudian dioperasikan hingga tekanan terendah pada kondisi

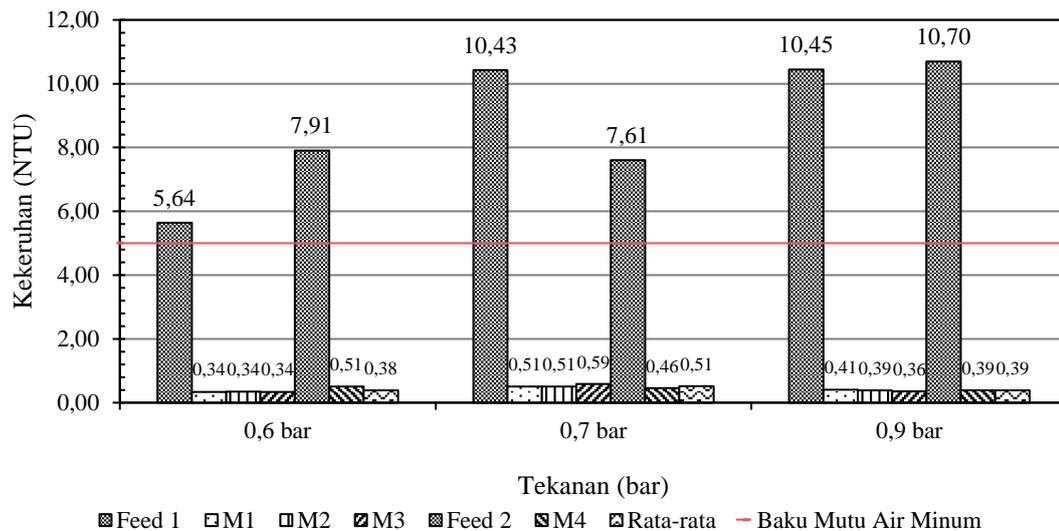
penelitian dan dilakukan analisis. Penelitian ini dilakukan secara *intermitten on/off* pompa. Proses filtrasi dihentikan ketika pompa dan air efluen yang dihasilkan panas. Hal ini dilakukan untuk menjaga kinerja pompa yang digunakan selama operasional agar tetap stabil.

4.2.1 Analisis Pengaruh Tekanan Terhadap Parameter Kualitas

Pengujian parameter kualitas efluen membran dilakukan untuk mengukur selektivitas membran dalam menahan suatu spesi atau melewatkan suatu spesi dari membran. Kemampuan selektivitas membran cenderung berbeda pada setiap spesi yang terkandung pada air umpan. Hal ini dikarenakan selektivitas membran dipengaruhi oleh interaksi antar muka dengan spesi yang melewati (Notodarmojo *et al.*, 2004). Perlu adanya nilai koefisien rejeksi (%R) yang dihasilkan pada setiap parameter sebagai tolak ukur selektivitas membran. Berdasarkan hasil *running* yang dilakukan dengan variasi kondisi tekanan 0,6 bar, 0,7 bar dan 0,9 bar didapatkan data hasil pengujian kualitas air yang terdiri dari nilai kekeruhan, zat organik, TSS, mikroplastik, total *coliform* dan *E. coli*. Hasil pengujian kualitas air dibandingkan dengan baku mutu pada Permenkes No. 492 Tahun 2010 tentang Persyaratan Kualitas Air Minum. Pengujian parameter nilai kekeruhan, zat organik, mikroplastik dan TSS pada penelitian ini dilakukan di Laboratorium Teknologi Pengolahan Air ITS, sedangkan untuk parameter total *coliform* dan *E. coli* dilakukan pada Laboratorium PDAM Ngagel II. Sampel yang diujikan merupakan sampel yang diambil pada saat jam terakhir operasi membran ketika *fouling*. Hal ini dapat dilakukan karena membran keramik telah terbukti memiliki kestabilan terhadap konsentrasi bahan kimia, temperatur maupun tekanan (Guerra & Pellegrino, 2013). Sampel diambil menggunakan botol PET 1,5 L, botol kaca 500 mL dan botol duran steril 100 mL.

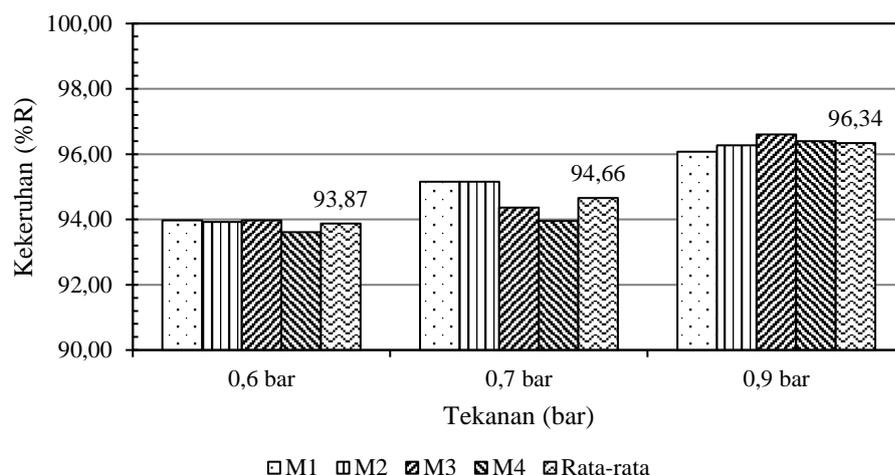
a. Analisis Pengaruh Tekanan Terhadap Parameter Kekeruhan

Kekeruhan merupakan salah satu parameter fisik kualitas air yang tercantum dalam Peraturan Menteri Kesehatan No. 492 Tahun 2010. Kekeruhan merupakan sifat pembiasan dan atau penyerapan optik dari suatu cairan (Badan Standardisasi Nasional, 2005). Kekeruhan pada air timbul karena adanya kandungan bahan organik dan anorganik, padatan tersuspensi, warna, koloid, serta mikroorganisme perairan yang memberikan pengaruh terhadap intensitas cahaya matahari yang masuk kedalam air (Suhendar *et al.*, 2020). Kekeruhan pada air dinyatakan dalam turbiditas yang diukur menggunakan turbidimeter HANNA *Instrument* HI88703 dengan satuan pengukuran *Nephelometric Turbidity Units* (NTU) dengan prinsip hamburan cahaya yang melewati cairan. Pengukuran kekeruhan dilakukan tiap variasi tekanan pada tiap variasi *spacer* membran. Nilai kekeruhan yang telah diuji dibandingkan dengan karakteristik air umpan (*feed*) yang diolah untuk mengetahui nilai koefisien rejeksi (%R) yang dihasilkan oleh membran. Analisis nilai kekeruhan pada *feed* dilakukan 2 kali. Hal ini dikarenakan pengujian kondisi penelitian antara membran M1, M2, dan M3 dengan membran M4 tidak dilakukan secara bersamaan pada hari yang sama. Sehingga dilakukan pengambilan *feed* kembali agar kinerja membran yang terukur sesuai dengan kondisi air umpan yang diolah. Berdasarkan data pada Gambar 4.1 nilai kekeruhan yang dihasilkan pada tiap variasi tekanan telah memenuhi baku mutu persyaratan kualitas air. Konsentrasi nilai kekeruhan terendah terjadi pada tekanan 0,6 bar dengan rata-rata 0,38 NTU.



Gambar 4.1 Pengaruh Tekanan Terhadap Konsentrasi Efluen Kekeruhan

Apabila dibandingkan dengan konsentrasi nilai kekeruhan pada *feed* yang diolah pada membran, maka secara keseluruhan nilai koefisien rejeksi (%R) yang dihasilkan sudah cukup tinggi. Berdasarkan data pada Gambar 4.2 diperoleh nilai koefisien rejeksi (%R) rata-rata tertinggi terjadi pada tekanan 0,9 bar sebesar 96,34%, sedangkan nilai koefisien rejeksi (%R) rata-rata terendah terjadi pada tekanan 0,6 bar sebesar 93,87%. Hal ini menandakan bahwa semakin tinggi tekanan operasi yang digunakan, semakin tinggi nilai koefisien rejeksi yang dihasilkan terhadap parameter kekeruhan. Nilai koefisien rejeksi (%R) yang mampu dihasilkan oleh membran dipengaruhi juga oleh kemampuan selektivitas membran terhadap karakteristik air umpan yang diolah (Mulder, 1996). Fluktuasi kekeruhan yang terjadi pada air umpan dapat disebabkan oleh beberapa faktor antara lain, dosis koagulan, kondisi aliran unit sedimentasi dan musim. Pada musim penghujan seperti yang terjadi pada saat kondisi penelitian, memungkinkan nilai kekeruhan berfluktuasi cukup tinggi (Hidayah & Karnaningroem, 2010; Yogaswara & Moesriati, 2021).



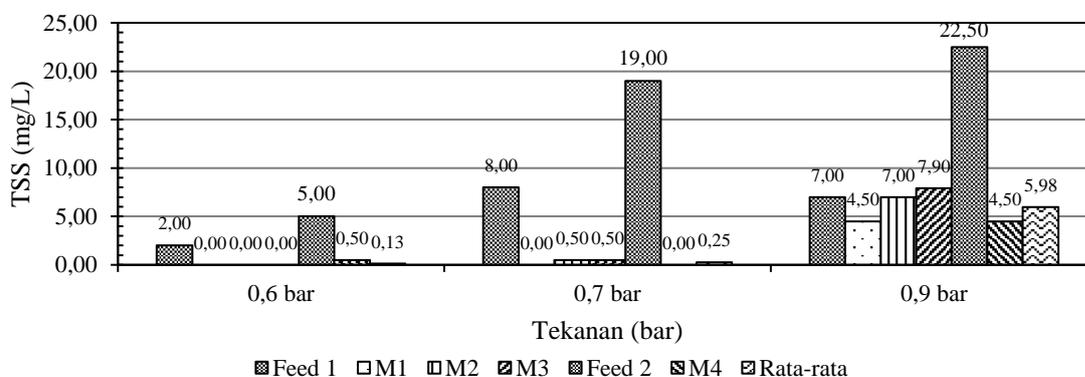
Gambar 4.2 Pengaruh Tekanan Terhadap Nilai Koefisien Rejeksi (%R) Kekeruhan

Hasil temuan yang diperoleh berdasarkan grafik nilai koefisien rejeksi rata-rata (%R) dalam penelitian ini mencapai maksimum pada tekanan 0,9 bar dengan rejeksi rata-rata sebesar 96,34%. Maka, dapat dinyatakan bahwa nilai koefisien rejeksi (%R) parameter kekeruhan

meningkat seiring dengan peningkatan tekanan operasi pada membran. Hal ini disebabkan karena permeabilitas *solvent* lebih tinggi dibandingkan permeabilitas *solute*, sehingga hasil permeat yang melalui membran dengan tekanan yang lebih tinggi memiliki kandungan *solvent* lebih tinggi (Riduan, 2003). Berdasarkan penelitian yang dilakukan Riduan, (2003) seiring dengan kenaikan tekanan, nilai koefisien rejeksi akan mencapai maksimum pada tekanan tertentu kemudian nilai koefisien rejeksi akan menurun. Tekanan optimum pada kekeruhan masih belum terjadi pada *range* tekanan 0,6-0,9 bar menggunakan membran keramik *flat-sheet* terendam. Sehingga pada tekanan yang lebih tinggi memungkinkan *immersed membrane* mikrofiltrasi berbahan keramik mencapai efisiensi rejeksi yang lebih tinggi.

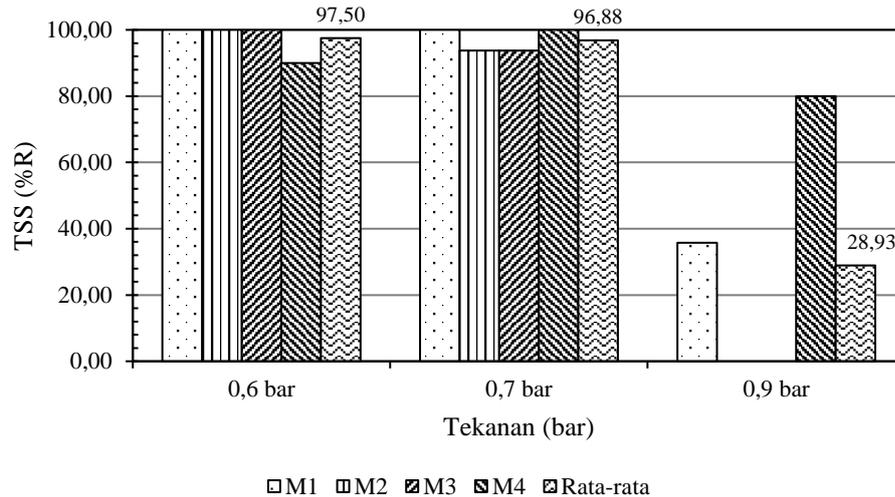
b. Analisis Pengaruh Tekanan Terhadap Parameter TSS

Total Suspended Solid (TSS) merupakan material tersuspensi dengan ukuran diameter >1 µm. Kandungan TSS pada perairan disebabkan karena adanya pengikisan tanah yang terbawa hingga badan air. TSS pada umumnya terdiri dari material organik dan anorganik yang berupa lumpur, pasir halus, *microalgae* dan jasad renik (Maulana *et al.*, 2020). Berdasarkan ukuran partikelnya, TSS merupakan salah satu partikel *foulant* (pengotor) yang mampu ditahan oleh membran mikrofiltrasi (Riduan, 2003). Partikel tersuspensi dengan jumlah besar akan menyumbat pori-pori pada permukaan membran sehingga menyebabkan terjadinya *fouling*. *Fouling* yang disebabkan oleh partikel tersuspensi tergolong jenis *fouling* yang sulit dihilangkan secara fisik (*irreversible fouling*) karena TSS telah menyumbat hingga pori-pori membran tidak hanya di permukaan membran, kecuali bila dihilangkan dengan dilakukan pencucian secara backwash dengan penggunaan bahan kimia (Kramer *et al.*, 2020). Pencucian menggunakan bahan kimia secara terus-menerus harus dapat dikontrol karena mampu menyebabkan penurunan masa pakai membran dan pembuangan bahan kimia pencuci (Yamamura *et al.*, 2007). Namun, sebagai proses penyisihan berdasarkan gaya dorong berupa tekanan (*pressure driven*), akumulasi padatan tersuspensi akan terus terjadi pada permukaan membran selama operasional (Goh *et al.*, 2018). Dengan pengaturan tekanan operasi yang optimum, konsentrasi padatan tersuspensi pada membran mampu dikontrol sehingga dapat meminimalisir frekuensi pencucian membran. Berdasarkan data pada Gambar 4.3 diketahui bahwa konsentrasi padatan tersuspensi total (TSS) terendah didapatkan pada tekanan 0,6 bar dengan konsentrasi rata-rata 0,13 mg/L, sedangkan nilai konsentrasi TSS tertinggi terjadi pada tekanan 0,9 bar dengan konsentrasi rata-rata 5,98 mg/L. Dengan mempertimbangkan data nilai kekeruhan yang didapat, hal ini membuktikan bahwa TSS dan nilai kekeruhan berbanding lurus. Semakin tinggi kandungan TSS dalam air, maka semakin tinggi nilai kekeruhan (Suhendar *et al.*, 2020).



Gambar 4.3 Pengaruh Tekanan Terhadap Konsentrasi Efluen TSS

Apabila dilakukan perbandingan terhadap konsentrasi air umpan (*feed*) yang diolah pada masing-masing tekanan dapat diketahui kemampuan selektivitas membran terhadap parameter TSS berdasarkan nilai koefisien rejeksi (%R) yang dihasilkan. Nilai koefisien rejeksi (%R) tertinggi terhadap parameter TSS terjadi pada tekanan 0,6 bar dengan rata-rata rejeksi yang tercapai sebesar 97,50%. Akan tetapi, pada tekanan 0,9 bar terjadi penurunan rejeksi hingga nilai rejeksi rata-rata (%R) pada tekanan 0,9 bar sebesar 28,93%. Hal tersebut menandakan bahwa semakin tinggi tekanan yang ditetapkan, semakin besar konsentrasi TSS yang lolos melalui membran.

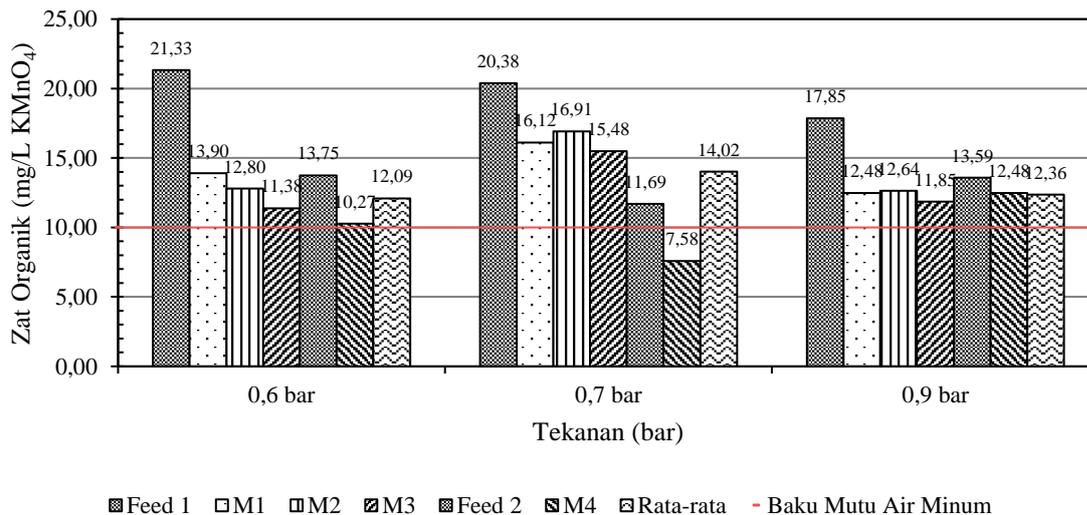


Gambar 4.4 Pengaruh Tekanan Terhadap Nilai Koefisien Rejeksi (%R) TSS

Penurunan konsentrasi padatan tersuspensi dapat terjadi akibat penyumbatan pori pada membran sehingga memperkecil ukuran pori membran. Penurunan ukuran pori pada membran menyebabkan peningkatan kemampuan rejeksi membran terhadap padatan tersuspensi karena memperkecil ukuran padatan yang mampu dilewatkan melalui membran (Notodarmojo & Deniva, 2004). Retensi yang terjadi pada permukaan membran akibat akumulasi padatan akan mengurangi gaya dorong pada membran sehingga terjadi fenomena *fouling* (Riduan, 2003). Fenomena *fouling* yang terjadi akan mempengaruhi produktivitas membran (Yamamura *et al.*, 2007). Dalam upaya mempertahankan kondisi aliran produk permeat yang dihasilkan membran, maka dibutuhkan peningkatan tekanan operasi. Ketika tekanan operasi meningkat akumulasi padatan pada permukaan membran berpotensi untuk lolos dan terbawa pada outlet, sehingga konsentrasi TSS akan mengalami kenaikan pada saat awal operasi tekanan tinggi seperti yang terjadi pada data Gambar 4.4 dengan kondisi tekanan 0,9 bar. Penurunan selektivitas yang signifikan pada tekanan 0,9 bar juga mampu disebabkan oleh kesalahan analisis sampel maupun peralatan laboratorium yang digunakan. Pengaruh tekanan operasi pada *range* 0,6-0,9 bar dalam penelitian ini cukup memberikan gambaran kinerja membran terhadap nilai konsentrasi parameter TSS yang mampu disisihkan. Kesesuaian tekanan operasi yang diterapkan juga dipengaruhi oleh spesifikasi jenis membran, lokasi implementasi serta karakteristik air umpan (*feed*) yang diolah (Al-Shammari *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2011). Penggunaan membran mikrofiltrasi *flat-sheet* berbahan keramik secara terendam pada bak sedimentasi IPAM PDAM Ngagel III didapatkan tekanan tertinggi terhadap penyisihan TSS pada tekanan 0,6 bar.

c. Analisis Pengaruh Tekanan Terhadap Parameter Zat Organik

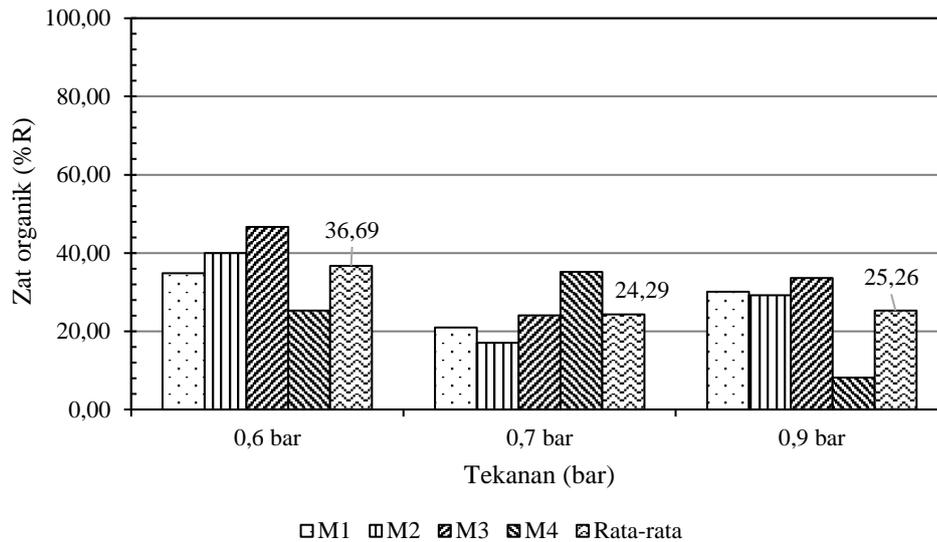
Zat organik merupakan parameter fisik kualitas air minum yang mampu mempengaruhi kekeruhan pada air. Kandungan bahan organik pada air laut pada umumnya terdiri dari bahan organik terlarut dan bahan organik tidak terlarut. Bahan organik terlarut memiliki ukuran <0,5 μm , sedangkan bahan organik tidak terlarut memiliki ukuran >0,5 μm (Santoso, 2018). Zat organik pada bak sedimentasi telah mengalami proses oksidasi oleh mikroorganisme sehingga nilai konsentrasinya dapat menurun. Hal ini terjadi karena zat organik merupakan makanan bagi mikroorganisme pada reaktor sehingga pertumbuhan mikroorganisme akan mempengaruhi kekeruhan pada air umpan (*feed*) (Ariyanti *et al.*, 2020). Fluktuasi konsentrasi zat organik juga dapat terjadi akibat dosis koagulan yang digunakan karena penyisihan zat organik pada pengolahan air minum umumnya terjadi pada koagulasi-flokulasi (Park *et al.*, 2020). Dalam penerapan teknologi membran mikrofiltrasi terendam jangka panjang, adanya kandungan zat organik pada air umpan mampu menyebabkan *irreversible fouling* pada permukaan membran (Yamamura *et al.*, 2007). Berdasarkan data Gambar 4.5 konsentrasi zat organik pada efluen membran mikrofiltrasi masih berada diatas baku mutu yang ditetapkan. Pada variasi tekanan yang berbeda, konsentrasi zat organik mengalami peningkatan ketika tekanan 0,7 bar dengan rata-rata konsentrasi 14,02 mg/L KMnO_4 . Konsentrasi terendah yang mampu dicapai oleh membran sebesar 12,09 mg/L KMnO_4 pada tekanan 0,6 bar dengan selisih konsentrasi 2,09 mg/L KMnO_4 dari ambang batas baku mutu.



Gambar 4.5 Pengaruh Tekanan Terhadap Konsentrasi Efluen Zat Organik

Selektivitas membran terhadap parameter zat organik dapat diketahui berdasarkan nilai koefisien rejeksi (%R) yang mampu dicapai oleh membran melalui variasi tekanan. Pada Gambar 4.6 terlihat bahwa efisiensi tertinggi penyisihan zat organik tercapai pada tekanan 0,6 bar dengan nilai koefisien rejeksi (%R) rata-rata sebesar 36,69%, sedangkan efisiensi terendah terjadi pada tekanan 0,7 bar dengan nilai koefisien rejeksi (%R) rata-rata sebesar 24,29%. Secara keseluruhan selektivitas membran terhadap parameter zat organik tergolong rendah. Hal ini menandakan bahwa kandungan zat organik terlarut lebih banyak dibandingkan zat organik yang tidak terlarut (Santoso, 2018). Oleh karena itu, konsentrasi zat organik yang lolos melalui membran masih cukup tinggi. Hasil temuan pada data Gambar 4.6 membuktikan bahwa proses penyisihan pada membran dipengaruhi oleh ukuran pori membran dan distribusi ukuran partikel yang disisihkan. Pada tekanan rendah, ukuran pori membran cenderung mengecil akibat penumpukan materi organik yang telah terjadi pada permukaan membran yang disebut polarisasi konsentrasi (Redjeki, 2011). Sehingga permeabilitas membran hanya akan mampu

dilalui oleh bahan organik terlarut dengan ukuran yang sangat kecil, sedangkan zat organik yang tidak terlarut akan tertahan di permukaan membran karena adanya peningkatan selektivitas oleh membran (Mulder, 1996; Notodarmojo & Deniva, 2004). Ketika akumulasi materi organik telah mencapai maksimum, maka peningkatan tekanan yang terjadi pada kondisi 0,7 bar akan mengakibatkan padatan yang menyumbat pori membran lolos karena mendapatkan gaya dorong tekanan (*pressure driven*) untuk dapat melakukan transpor massa melewati membran (Wang *et al.*, 2011). Hal ini menyebabkan selektivitas membran menurun sehingga nilai koefisien rejeksi yang dihasilkan rendah.



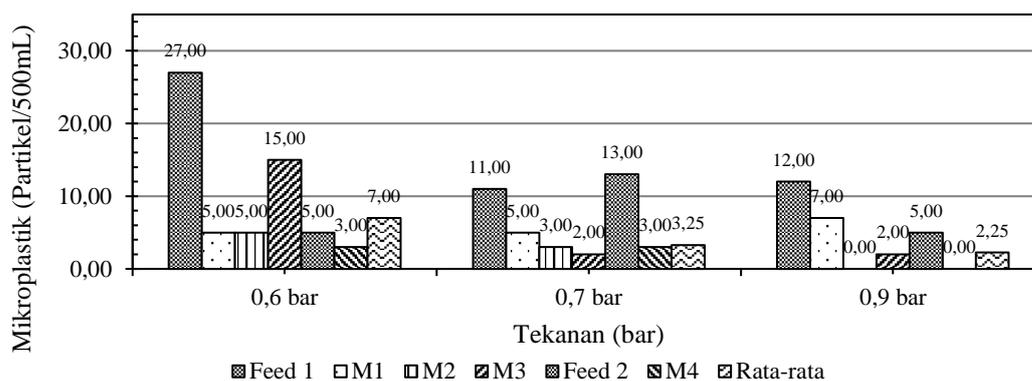
Gambar 4.6 Pengaruh Tekanan Terhadap Nilai Koefisien Rejeksi (%R) Zat Organik

Berdasarkan temuan pada Gambar 4.6 diketahui bahwa terjadi peningkatan nilai rejeksi yang terjadi pada tekanan 0,9 bar dari tekanan 0,7 bar. Peningkatan nilai rejeksi tersebut dapat terjadi ketika tekanan dinaikkan akumulasi materi organik akan terjadi terus menerus sehingga selektivitas membran meningkat (Goh *et al.*, 2018). Selain itu, peningkatan nilai rejeksi juga terjadi akibat proses adsorpsi oleh gumpalan zat organik yang terakumulasi semakin membesar sehingga melekat menjadi lumpur dengan akumulasi berat jenis yang lebih besar dapat mengendap karena adanya gaya gravitasi (Husaeni *et al.*, 2016; Sowmya *et al.*, 2020). Oleh karena itu, konsentrasi zat organik yang lolos melalui membran lebih sedikit. Penggunaan membran mikrofiltrasi *flat-sheet* berbahan keramik secara terendam pada bak sedimentasi IPAM PDAM Ngagel III menghasilkan tekanan tertinggi terhadap penyisihan zat organik tercapai pada tekanan 0,6 bar. Pengaruh tekanan operasi pada *range* 0,6-0,9 bar terhadap kinerja membran terhadap nilai konsentrasi parameter zat organik yang mampu disisihkan memberikan nilai efisiensi yang tergolong rendah. Hal ini disebabkan karena membran mikrofiltrasi maupun ultrafiltrasi tidak mampu menyisihkan partikel organik maupun inorganik yang terlarut sebelum diubah bentuknya menjadi partikel tersuspensi (Gray, 2014). Selain itu konsentrasi bahan organik terlarut yang lebih tinggi dibandingkan bahan organik tidak terlarut, dengan ukuran $>0,5 \mu\text{m}$ juga mempengaruhi efisiensi penyisihan yang dihasilkan oleh membran mikrofiltrasi terendam (Santoso, 2018).

d. Analisis Pengaruh Tekanan Terhadap Parameter Mikroplastik

Keberadaan mikroplastik pada instalasi air permukaan dan air minum yang dikonsumsi menjadi perhatian yang besar. Mikroplastik merupakan partikel plastik yang memiliki ukuran dibawah 5 mm, namun 95% ukuran mikroplastik yang ditemukan pada air baku maupun air

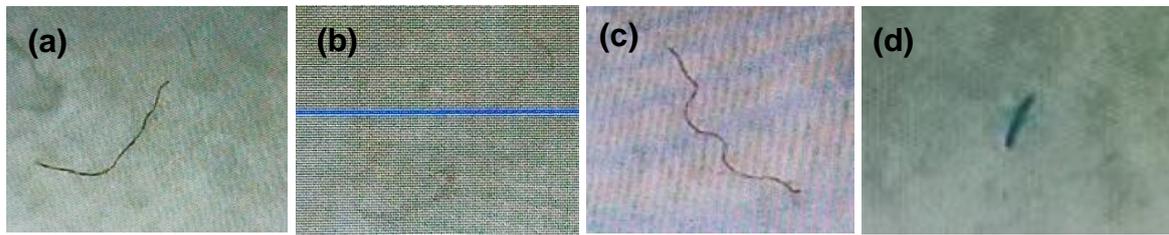
minum memiliki ukuran 1-10 μm . Jumlah partikel mikroplastik rata-rata pada air baku berkisar antara 1473 ± 34 hingga 3605 ± 497 partikel/L dan pada air olahan berkisar antara 338 ± 76 hingga 628 ± 28 partikel/L (Pivokonsky *et al.*, 2018). Distribusi kelimpahan mikroplastik pada Kali Surabaya menurut penelitian yang dilakukan oleh Lestari *et al.*, (2020) memiliki konsentrasi tertinggi pada titik DAM Jagir dengan konsentrasi mikroplastik pada permukaan sungai sebesar $43,11$ partikel/ m^3 , kedalaman tengah sungai $11,58$ partikel/ m^3 dan dasar sungai $8,80$ partikel/ m^3 . Konsentrasi mikroplastik yang tinggi berpotensi masuk ke dalam sistem pengolahan pada instalasi PDAM Ngagel III melalui intake. Ukuran partikel mikroplastik yang ditemukan pada instalasi air minum yang dengan air baku berasal dari sungai berkisar antara <1 hingga >100 μm (Pivokonsky *et al.*, 2018). Dengan ukuran yang sangat kecil, penyisihan mikroplastik pada instalasi pengolahan air minum yang diterapkan menjadi lebih sulit. Prinsip penyisihan parameter mikroplastik didasarkan pada ukuran partikel yang akan dipisahkan (*size exclusion*) atau berdasarkan transport saringan (*sieving*) seperti pada parameter lainnya (Wang *et al.*, 2011). Pengujian sampel mikroplastik dilakukan menggunakan metode *Wet Peroxide Oxidation* (WPO) dengan 3 tahapan yaitu, degradasi bahan organik, pemisahan densitas dan penyaringan (Hanif *et al.*, 2021). Karakteristik bentuk partikel mikroplastik dapat dilihat menggunakan *microscope* (Lestari *et al.*, 2020). Berdasarkan data pada Gambar 4.7 dapat diketahui bahwa nilai konsentrasi mikroplastik terendah terjadi pada tekanan 0,9 bar dengan rata-rata 2,25 partikel/500mL, sedangkan nilai konsentrasi mikroplastik tertinggi terjadi pada tekanan 0,7 bar dengan rata-rata 7 partikel/500mL. Dengan ukuran pori membran yang diterapkan pada penelitian ini, maka partikel mikroplastik yang mampu lolos melalui membran merupakan partikel dengan ukuran $<0,05$ μm . Mikroplastik memiliki waktu tinggal yang lama, stabilitas tinggi, serta berpotensi terfragmentasi menjadi partikel yang lebih kecil dan menyerap kontaminan lainnya. Partikel mikroplastik berukuran nano (<1 μm) yang terkandung dalam air dapat diserap oleh manusia dan organisme akuatik (invertebrata dan plankton) (Padervand *et al.*, 2020). Berdasarkan penelitian oleh Triebkorn *et al.*, (2019) partikel mikroplastik berbahan polistirena dengan ukuran $0,25 \pm 0,06$ μm mampu diserap oleh keratinosit manusia yang memungkinkan untuk lolos melalui membran.



Gambar 4.7 Pengaruh Tekanan Terhadap Konsentrasi Efluen Mikroplastik

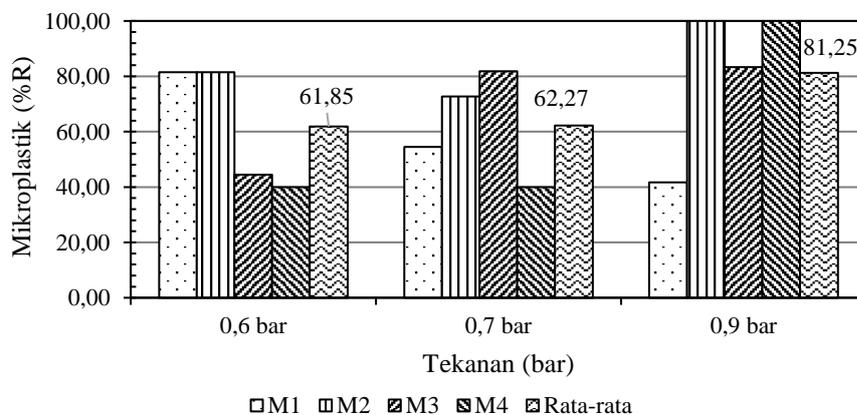
Bentuk partikel mikroplastik dapat berupa serat (*fiber*), fragmen dan bulat (Wang *et al.*, 2020). Berdasarkan data analisis parameter mikroplastik yang mampu melalui membran, sebagian besar memiliki bentuk serat (*fiber*) seperti pada Gambar 4.8. Serat (*fiber*) merupakan bentuk partikel mikroplastik yang panjang dan tipis dengan ukuran diameter serat. Bentuk serat (*fiber*) merupakan bentuk terbanyak berdasarkan temuan pada air baku dan instalasi pengolahan air minum sehingga potensi kontaminasi mikroplastik berbentuk serat cukup tinggi. Serat

mikroplastik dapat berasal dari degradasi material mengandung plastik atau proses mekanik hasil pencucian yang dibuang menuju air permukaan (Pivokonsky *et al.*, 2018).



Gambar 4.8 Partikel Mikroplastik Serat (*fiber*), (a) Hitam, (b) Transparan, (c) Merah), (d) Biru

Selektivitas membran terhadap parameter mikroplastik dapat diketahui berdasarkan nilai koefisien rejeksi (%R) yang mampu dicapai oleh membran. Pada Gambar 4.9 terlihat bahwa efisiensi tertinggi penyisihan mikroplastik tercapai pada tekanan 0,9 bar dengan nilai koefisien rejeksi (%R) rata-rata sebesar 81,25%, sedangkan efisiensi terendah terjadi pada tekanan 0,6 bar dengan nilai koefisien rejeksi (%R) rata-rata sebesar 61,85%. Hal ini menandakan bahwa kandungan mikroplastik mampu lolos pada kondisi tekanan yang lebih rendah karena pada tekanan rendah ukuran pori membran mengecil, sehingga partikel mikroplastik yang memiliki ukuran lebih kecil berpotensi lebih cepat menyumbat pori membran (Mulder, 1996). Berdasarkan kelimpahan partikel mikroplastik yang lolos, terdapat kemungkinan diameter serat mikroplastik lebih kecil dibandingkan diameter pori membran. Oleh karena itu jumlah partikel mikroplastik yang lolos melalui membran pada saat operasi berlangsung masih cukup tinggi. Semakin kecil ukuran mikroplastik dalam air, semakin sulit untuk dilakukan penyisihan hanya secara fisik. Pada penelitian yang dilakukan oleh Ma *et al.*, (2019), ukuran mikroplastik yang semakin kecil memberikan efisiensi yang lebih tinggi menggunakan penyisihan secara fisik-kimia. Selain itu, ukuran partikel yang direjeksi juga mempengaruhi terjadinya *fouling* pada membran. Semakin besar partikel mikroplastik yang disisihkan semakin kasar akumulasi lapisan cake pada permukaan membran sehingga mengurangi terjadinya penyumbatan pada pori membran (Ma *et al.*, 2019). Kelimpahan mikroplastik pada efluen membran memungkinkan bahwa ukuran mikroplastik yang lolos >0,05 μm . Hal tersebut dapat terjadi karena adanya kontaminasi dari sambungan reaktor ataupun *frame* membran yang telah terfragmentasi ketika operasi berlangsung.



Gambar 4.9 Pengaruh Tekanan Terhadap Nilai Koefisien Rejeksi (%R) Mikroplastik

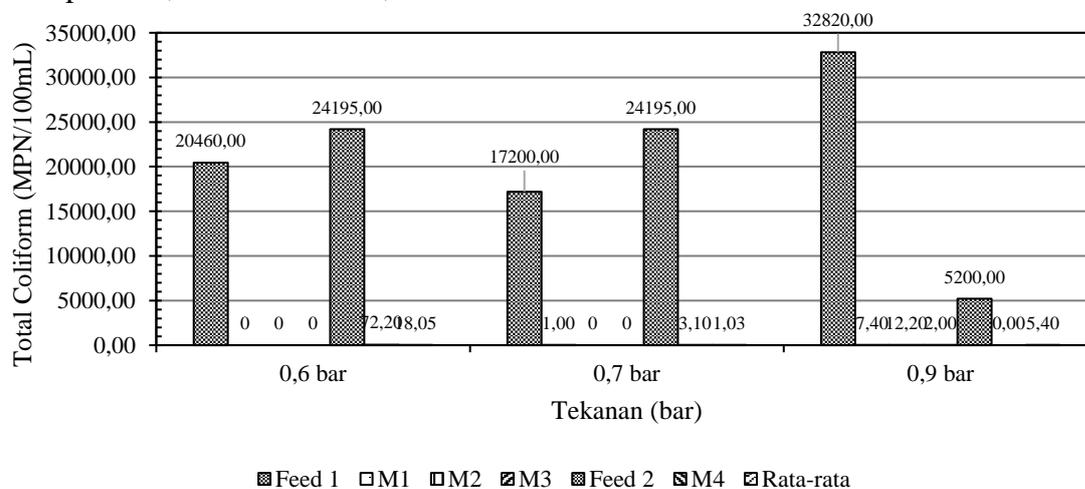
Berdasarkan temuan hasil analisis pada tiap membran yang diuji, kinerja membran mampu menyisihkan partikel mikroplastik hingga 100% ketika variasi tekanan 0,9 bar. Hal ini

dapat terjadi karena pada saat tekanan 0,9 bar akumulasi lapisan *cake* pada permukaan membran memiliki kekasaran yang tinggi, sehingga mengurangi terjadinya penyumbatan pada pori membran akibat adanya konsentrasi partikel mikroplastik (Ma *et al.*, 2019). Hasil temuan yang diperoleh berdasarkan grafik pengaruh tekanan dengan nilai koefisien rejeksi rata-rata (%R) dalam parameter mikroplastik mencapai maksimum pada tekanan 0,9 bar dengan rejeksi rata-rata sebesar 81,25%. Maka, dapat disimpulkan membran mikrofiltrasi *flat-sheet* berbahan keramik secara terendam pada bak sedimentasi IPAM PDAM Ngagel III menghasilkan tekanan tertinggi terhadap penyisihan mikroplastik tercapai pada tekanan 0,9 bar.

e. Analisis Pengaruh Tekanan Terhadap Parameter Total *Coliform* dan *E. coli*

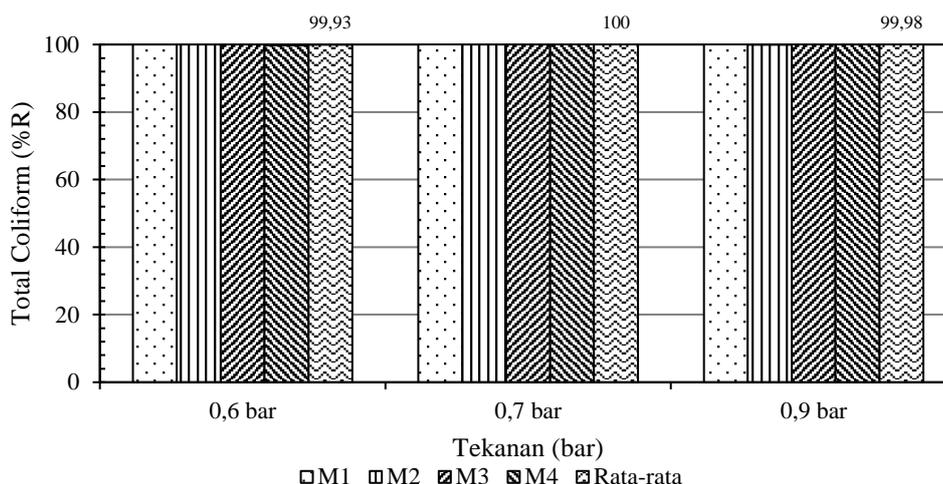
Partikel yang dapat dipisahkan menggunakan membran mikrofiltrasi terbatas pada partikel tersuspensi, koloid, bakteri dan beberapa virus dengan ukuran tertentu (Warsinger *et al.*, 2018). Mikroorganisme patogen yang mengkontaminasi air minum sangat bervariasi. Berdasarkan ukurannya dapat terdiri dari protozoa (4-100 μm), bakteri (0,2-1,0 μm), dan virus (0,01-0,1 μm). Membran mikrofiltrasi dengan ukuran 0,2 μm mampu menyisihkan bakteri seperti *E. coli*, *salmonella*, dan kolera serta protozoa (*Cryptosporidium*, *Giardia*), sedangkan penyisihan virus dapat dilakukan menggunakan membran ultrafiltrasi dengan ukuran 0,01 μm . Pada proses filtrasi menggunakan membran, mikroorganisme patogen tidak dihancurkan atau dinonaktifkan melainkan dipisahkan dari produk permeal sehingga perlu dilakukan pengolahan terhadap air bekas pencucian membran ketika pengurasan bak sedimentasi (Gray, 2014).

Pada penelitian ini mikroorganisme yang diuji sebagai parameter biologis adalah kandungan total *coliform* dan *E. coli*. *Coliform* merupakan jasad yang ditemukan pada tinja manusia dan tinggal di dalam usus manusia/hewan berdarah panas sebagai indikator kualitas mikrobiologis. Apabila bakteri *coliform* terkandung didalam air, maka air tersebut diindikasikan telah terkontaminasi oleh kotoran manusia/hewan berdarah panas (Kasam *et al.*, 2009). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Said & Hartaja, (2018), kondisi kualitas air baku pada Instalasi Pengolahan Air Minum Ngagel mengandung bakteri total *coliform* dan *E. coli* yang melebihi baku mutu air kelas I dan II, sehingga diperlukan jumlah khlor cukup tinggi ketika proses desinfeksi. Prosedur analisis total *coliform* dilakukan menggunakan metode Idexx Colilert. Berdasarkan data hasil pengaturan tekanan operasi pada membran diketahui bahwa sebagian kandungan total *coliform* belum memenuhi baku mutu yang berlaku. Konsentrasi total *coliform* rata-rata terendah yang dihasilkan sebesar 1,03 MPN/100 mL pada saat operasi tekanan 0,7 bar, sedangkan konsentrasi total *coliform* rata-rata tertinggi ditemukan pada saat tekanan operasi 0,6 bar sebesar 18,05 MPN/100mL.



Gambar 4.10 Pengaruh Tekanan Terhadap Konsentrasi Efluen Total *Coliform*

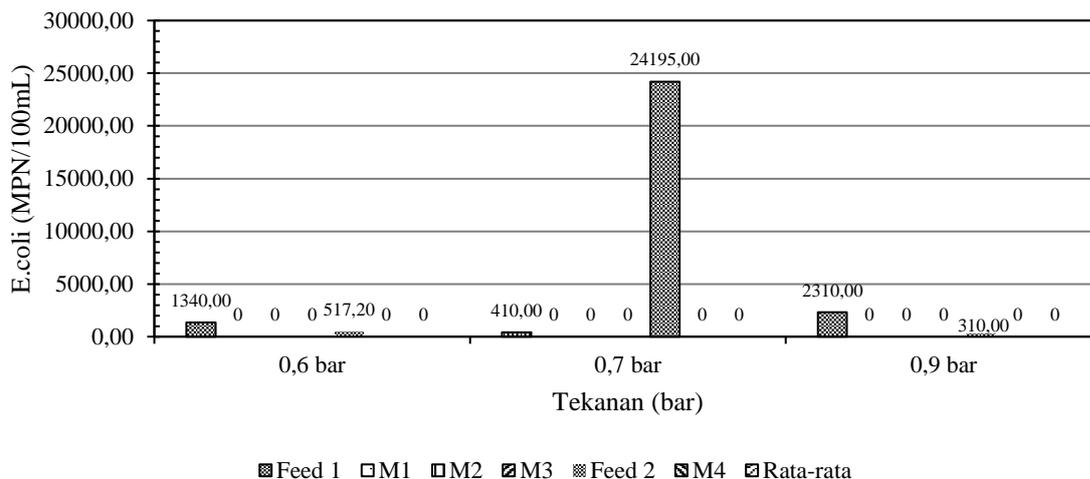
Pada Gambar 4.11 terlihat bahwa efisiensi tertinggi penyisihan total *coliform* tercapai pada tekanan 0,7 bar dengan nilai koefisien rejeksi (%R) rata-rata sebesar 100%, sedangkan efisiensi terendah terjadi pada tekanan 0,6 bar dengan nilai koefisien rejeksi (%R) rata-rata sebesar 99,93%. Apabila dibandingkan dengan kandungan awal pada air umpan, secara keseluruhan, selektivitas membran terhadap parameter total *coliform* tergolong tinggi. Hal ini dapat terjadi karena sebagian besar bakteri total *coliform* memiliki ukuran antara 0,5 x 0,3 μm (Nurtsani, 2018).



Gambar 4.11 Pengaruh Tekanan Terhadap Nilai Koefisien Rejeksi (%R) Total *Coliform*

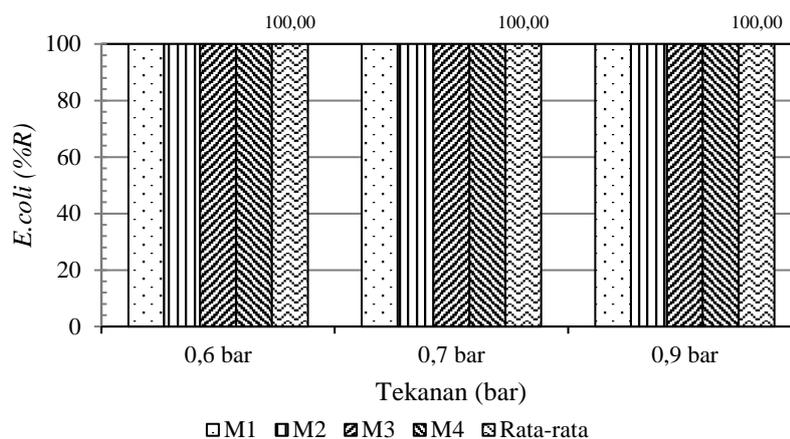
Berdasarkan hasil temuan pada Gambar 4.11 diketahui bahwa terjadi peningkatan nilai rejeksi pada tekanan 0,7 bar. Peningkatan nilai rejeksi tersebut dapat terjadi karena ketika tekanan dinaikkan, akumulasi total *coliform* akan terjadi terus menerus sehingga selektivitas membran meningkat dan konsentrasi total *coliform* yang lolos melalui membran lebih sedikit (Goh *et al.*, 2018). Namun pada tekanan yang lebih tinggi efisiensi rejeksi dapat menurun karena akumulasi pengotoran yang ada dipermukaan berpotensi lolos dengan adanya tekanan yang lebih tinggi (Riduan, 2003). Hasil tersebut membuktikan bahwa proses penyisihan pada membran dipengaruhi oleh ukuran pori membran dan distribusi ukuran partikel yang disisihkan (Mulder, 1996). Ukuran pori membran mampu menyisihkan sebagian besar bakteri *coliform* yang terkandung pada air umpan. Pengaruh tekanan operasi pada *range* 0,6-0,9 bar terhadap kinerja membran pada parameter total *coliform* memberikan nilai efisiensi yang tinggi. Kinerja terbaik pada tekanan 0,7 bar dengan nilai koefisien rejeksi (%R) rata-rata sebesar 100%.

Escherichia Coli (*E. coli*) merupakan bakteri golongan *coliform* yang berbentuk gram negatif dan membentuk spora. Keberadaan *E. coli* pada air minum berpotensi menyebabkan diare apabila dikonsumsi melebihi baku mutu (Kasam *et al.*, 2009). Kondisi kualitas air baku pada Instalasi Pengolahan Air Minum Ngagel mengandung bakteri total *coliform* dan *E. coli* yang melebihi baku mutu air kelas I dan II, sehingga diperlukan jumlah khlor cukup tinggi ketika proses desinfeksi (Said & Hartaja, 2018). Prosedur analisis *E. coli* dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan hasil penurunan dari kandungan Total *Coliform* menggunakan metode Idexx Colilert. Berdasarkan Gambar 4.12 hasil analisis kandungan *E. coli* pada efluen membran mikrofiltrasi terendam dapat diketahui bahwa kandungan *E. coli* pada setiap variasi tekanan telah memenuhi baku mutu yang berlaku yaitu 0 MPN/100 mL. Hal ini terjadi karena bakteri *E. coli* memiliki ukuran antara 1-1,5 μm x 2-6 μm (Nurtsani, 2018).



Gambar 4.12 Pengaruh Tekanan Terhadap Konsentrasi Efluen *E. coli*

Apabila dibandingkan dengan kualitas air umpan yang diolah, maka nilai rejeksi yang tercapai pada setiap variasi tekanan membran memiliki rata-rata sebesar 100% seperti pada Gambar 4.13. Hal ini membuktikan bahwa bakteri *E. coli* yang terkandung dalam air umpan memiliki ukuran $>0,05 \mu\text{m}$ sehingga mampu ditahan oleh pori membran mikrofiltrasi di setiap variasi tekanan.



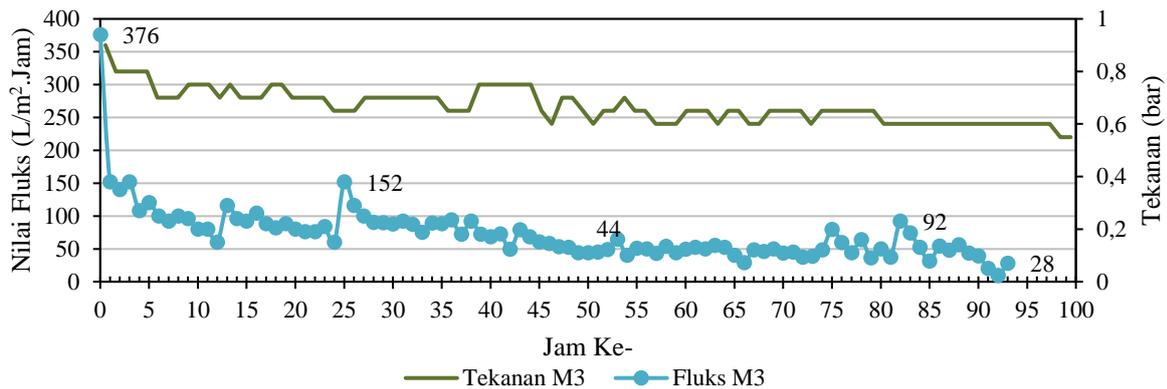
Gambar 4.13 Pengaruh Tekanan Terhadap Nilai Koefisien Rejeksi (%R) *E. coli*

Keseluruhan variasi tekanan operasi dalam penyisihan *E. coli* memberikan hasil yang signifikan terhadap kinerja membran mikrofiltrasi secara terendam. Penyisihan bakteri *coliform* dan *E. coli* sangat dipengaruhi oleh ukuran pori membran yang digunakan (Gray, 2014). Hal ini dikarenakan spesifikasi membran mikrofiltrasi *flat-sheet* berbahan keramik secara terendam yang digunakan memiliki ukuran pori sangat kecil ($0,05 \mu\text{m}$) sehingga sangat andal dalam menahan retensi kandungan total *coliform* dan *E. coli* pada air umpan dengan kondisi tekanan yang bervariasi (Guerra & Pellegrino, 2013). Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa kinerja membran mikrofiltrasi terendam yang diimplementasikan pada unit sedimentasi PDAM Ngagel III memiliki kestabilan tekanan yang tinggi terhadap parameter *E. coli*.

4.2.2 Analisis Pengaruh Tekanan Terhadap Parameter Kuantitas

Pengujian kuantitas efluen produk permeat yang dihasilkan setiap kondisi tekanan dilakukan untuk menguji permeabilitas membran. Permeabilitas pada membran diukur untuk mengetahui kecepatan kinerja membran dalam melewati suatu spesi dari membran (Mulder, 1996). Berdasarkan hasil *running* yang dilakukan dengan variasi kondisi tekanan 0,6 bar, 0,7 bar dan 0,9 bar didapatkan data hasil pengukuran kuantitas air berupa debit produk dan lama operasi membran. Debit produk yang terukur dikonversi menjadi fluks untuk menyatakan permeabilitas pada permukaan membran. Fluks merupakan jumlah volume permeate yang melewati satu luasan membran pada waktu tertentu (Mulder, 1996). Luas membran mikrofiltrasi terendam yang digunakan adalah 0,15 m². Hasil pengukuran kuantitas air dibandingkan pada setiap variasi yang dilakukan. Pada penelitian ini, pengukuran dilakukan *on-site* secara manual menggunakan gelas ukur dan *timer*. Sampel fluks yang diukur merupakan sampel yang diambil pada setiap jam hingga jam terakhir operasi membran ketika *fouling*. Pengukuran fluks dan lama operasi membran juga dipengaruhi oleh kinerja pompa yang digunakan. Untuk mempertahankan kinerja pompa agar tidak terjadi penurunan fungsional maka penelitian ini dilakukan secara *intermittent on/off* pompa. Operasi dihentikan ketika pompa dan air efluen yang dihasilkan panas dan atau debitnya telah mencapai $\pm 15-20\%$ dari debit awal operasi sebagai tanda bahwa membran telah *fouling*. Ketika operasi berhenti, membran tetap disimpan secara terendam pada reaktor untuk menghindari penyumbatan secara permanen pada pori membran. Kemudian operasi dilanjutkan kembali ketika pompa telah dingin. Pengukuran debit efluen (permeat) dikonversi menjadi data fluks dengan perhitungan secara spesifik seperti pada Lampiran 5. Pengaturan tekanan negatif pada kondisi penelitian dilakukan secara alami berdasarkan penurunan gaya dorong tekanan (*pressure driven*) pada membran (Rahmawati *et al.*, 2021), dengan melakukan *set up* awal tekanan maksimal (0,9 bar) yang dapat dicapai oleh membran kemudian dioperasikan hingga tekanan terendah pada kondisi penelitian dan dilakukan analisis.

Pada analisis pengaruh tekanan terhadap parameter kuantitas dilakukan menggunakan data yang mengacu pada kondisi membran M3, yaitu membran dengan kondisi *spacer* kemiringan 75°. Pada kondisi membran tersebut, memiliki nilai fluks yang mendekati rata-rata dari fluks keempat membran yang digunakan sehingga telah representatif dalam memberikan gambaran kinerja membran yang digunakan. Berdasarkan hasil perhitungan nilai fluks pada membran seperti pada Gambar 4.14 diketahui bahwa operasi membran pada kondisi variasi tekanan awal 0,9 bar hingga tekanan terendah yang tercapai 0,55 bar terjadi selama 93 jam. Pada kondisi tersebut telah terjadi penurunan tekanan dan nilai fluks dari 376 L/ m².jam hingga mencapai 28 L/ m².jam. Laju penurunan fluks pada membran sejalan dengan prinsip pada membran dimana laju fluks akan menurun seiring dengan waktu (Mulder, 1996). Oleh karena itu ditentukan kondisi operasi tekanan yang optimum untuk mendapatkan nilai fluks yang stabil pada membran.



Gambar 4.14 Pengaruh Tekanan Terhadap Nilai Fluks

Berdasarkan Gambar 4.14 dapat diketahui nilai fluks tertinggi didapatkan pada saat tekanan 0,9 bar sebesar 376 L/m².jam dan nilai fluks terendah pada tekanan 0,55 bar 28 L/m².jam. Pergantian kondisi tekanan dapat diketahui dari kenaikan fluks pada grafik setelah adanya penurunan yang signifikan. Kenaikan fluks disebabkan karena penyetingan awal pompa kembali setelah proses *intermitten*. Pergantian variasi tekanan pada membran dapat diidentifikasi berdasarkan kestabilan tekanan yang ditunjukkan oleh manometer ketika penyetingan awal pompa serta peningkatan nilai fluks awal yang dihasilkan. Pengoprasian membran hingga variasi tekanan terendah dilakukan selama 90 jam. Berdasarkan Gambar 4.14 diketahui nilai fluks yang dihasilkan ketika operasi berlangsung pada setiap jam. Maka, dapat dilakukan perhitungan volume permeate dan nilai fluks rata-rata selama operasi variasi tekanan berlangsung pada masing-masing variasi tekanan dengan perhitungan seperti pada Lampiran 5. Pada Tabel 4.2 diketahui bahwa volume permeate tertinggi dihasilkan pada saat tekanan 0,7 bar sebesar 530,70 L, sedangkan volume terendah terjadi pada tekanan 0,6 bar sebesar 82,14 L. Nilai fluks rata-rata tertinggi terjadi pada kondisi tekanan 0,9 bar yaitu sebesar 112,42 L/m².jam dan nilai fluks rata-rata terendah terjadi pada tekanan 0,6 bar yaitu sebesar 49,78 L/m².jam. Nilai fluks tertinggi pada tekanan 0,9 bar terjadi karena tekanan memberikan gaya dorong pada permukaan membran sehingga retensi partikel *foulant* yang menyumbat pori membran akan terdorong keluar. Dorongan tersebut akan memperluas ukuran pori membran sehingga permeabilitas menjadi meningkat. Sehingga semakin tinggi tekanan operasi yang digunakan maka semakin besar nilai fluks yang dihasilkan (Mulder, 1996)

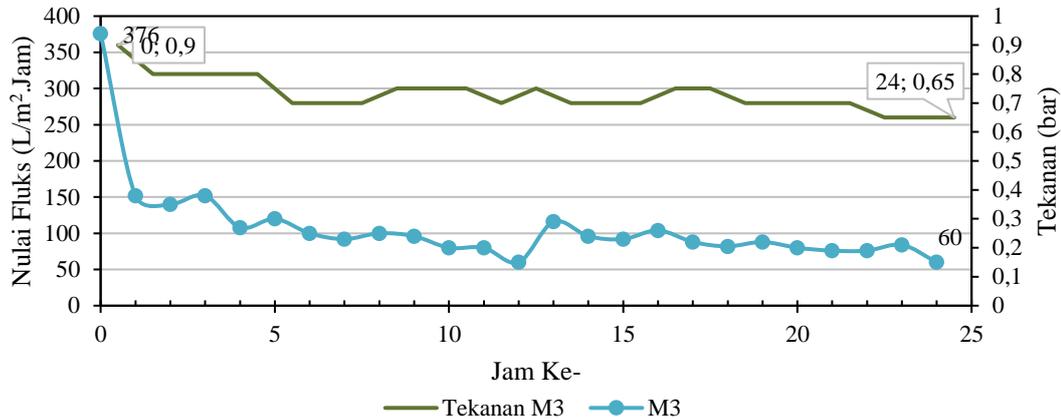
Tabel 4.2 Pengaruh Tekanan Terhadap Volume Permeate dan Lama Operasi Membran

Tekanan (bar)	Volume Permeate Total (L)	Lama Operasi (jam)	Nilai Fluks Rata-rata (L/m ² .jam)
0,9	404,70	24	112,42
0,7	530,70	55	64,33
0,6	82,14	11	49,78

a. Analisis Pengaruh Variasi Tekanan 0,9 bar Terhadap Fluks dan Lama Operasi

Penurunan laju fluks yang terlihat pada Gambar 4.15 menunjukkan bahwa debit efluen yang dihasilkan telah menurun pada jam ke-24. Hal ini membuktikan bahwa laju fluks akan menurun sejalan dengan waktu (*irreversible*) akibat adanya polarisasi konsentrasi, adsorpsi, kompaksi dan *fouling* yang terjadi pada permukaan membran (Wenten *et al.*, 2013). Pada jam ke-0 dengan kondisi tekanan 0,9 bar fluks membran yang tercapai sebesar 376 L/m².jam. Setelah operasi pada jam ke-24 fluks membran mencapai 60 L/m².jam. Variasi tekanan 0,9 bar dihentikan ketika fluks telah menurun hingga 60 L/m².jam. Pada saat operasi tekanan 0,9 bar

terjadi penurunan tekanan yang cukup signifikan selama 24 jam, dari penyetingan awal tekanan sebesar 0,9 bar menurun hingga menjadi 0,65 bar. Hal ini membuktikan bahwa operasi pada membran terjadi berdasarkan penurunan gaya dorong tekanan (*pressure driven*) pada membran (Rahmawati *et al.*, 2021). Dengan demikian lama operasi yang mampu dicapai oleh membran dengan variasi tekanan 0,9 bar adalah 24 jam. Nilai rata-rata fluks yang didapatkan selama operasi membran dengan tekanan 0,9 bar yaitu sebesar 112,42 L/m².jam dan volume permeat total yang dihasilkan sebesar 404,70 L.

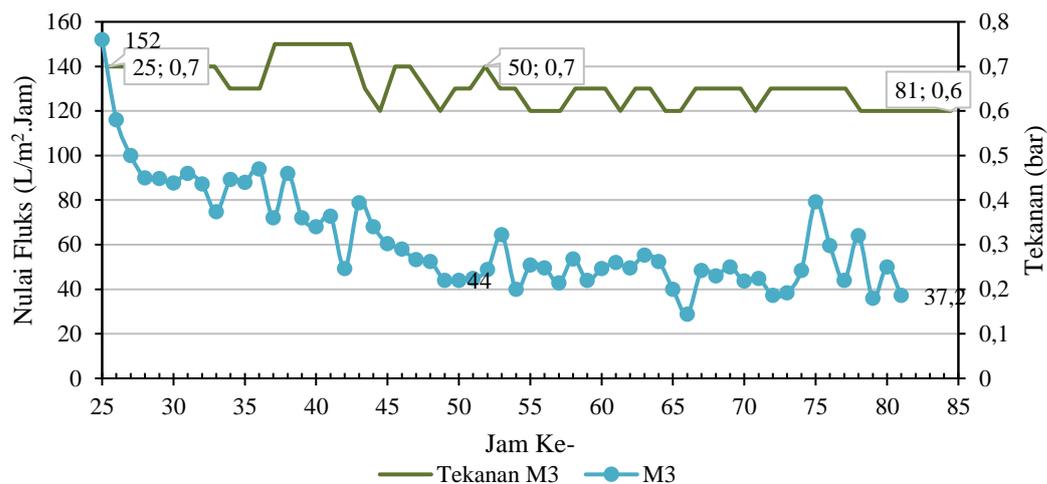


Gambar 4.15 Pengaruh Variasi Tekanan 0,9 bar Terhadap Nilai Fluks

Pengukuran kuantitas pada tekanan 0,9 bar dilakukan secara *intermitten* selama 4 hari. Kenaikan fluks pada jam ke- 13, 14, 16, dan 23 terjadi karena waktu operasi dimulai kembali setelah dihentikan. Ketika pompa dimatikan, partikel pengotor pada permukaan membran kehilangan retensinya untuk dapat menempel pada permukaan membran. Sedangkan ketika operasi berjalan, partikel pengotor dapat menempel karena adanya tekanan hisap yang berasal dari pompa. Akumulasi partikel pada permukaan membran menyebabkan ukuran dan berat jenis partikel semakin membesar sehingga partikel pengotor yang menempel akan jatuh karena adanya gravitasi ketika pompa dimatikan. Oleh karena itu, ketika operasi dimulai kembali nilai fluks akan mengalami sedikit kenaikan karena porositas membran menjadi lebih tinggi (Mulder, 1996; Wang *et al.*, 2011).

b. Analisis Pengaruh Variasi Tekanan 0,7 bar Terhadap Fluks dan Lama Operasi

Pada operasi membran dengan tekanan 0,7 bar, didapatkan nilai fluks rata-rata pada jam ke-0 sebesar 152 L/m².jam, sedangkan pada jam ke-55 fluks rata-rata membran mencapai 37,2 L/m².jam. Variasi tekanan 0,7 bar dihentikan ketika fluks telah menurun hingga 37,2 L/m².jam. Penurunan nilai fluks yang terjadi pada saat operasi membran merupakan indikasi terjadinya *fouling*. Ketika *fouling*, partikel pengotor akan memperkecil ukuran pori membran sehingga permeabilitas membran menjadi menurun (Mulder, 1996). Nilai rata-rata fluks yang didapatkan selama operasi membran dengan tekanan 0,7 bar yaitu sebesar 64,33 L/m².jam dan volume permeate total yang dihasilkan sebesar 530,70 L.

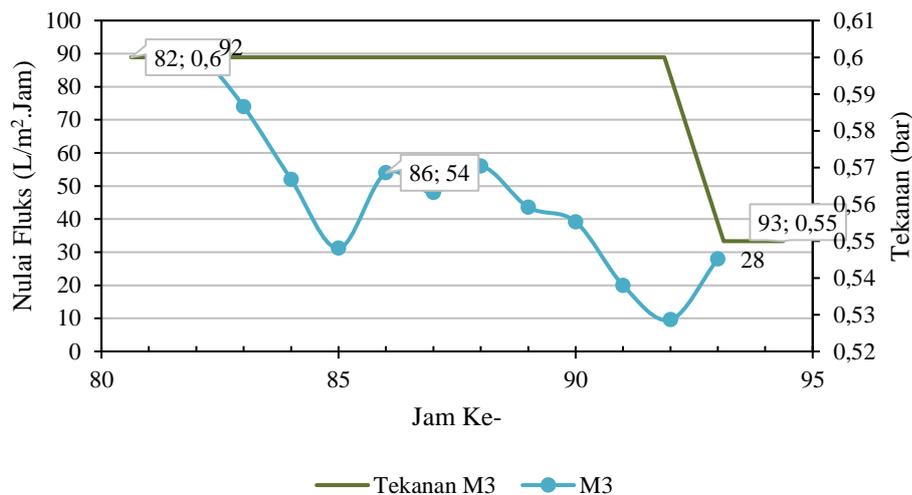


Gambar 4.16 Pengaruh Variasi Tekanan 0,7 bar Terhadap Nilai Fluks

Pengoperasian membran pada tekanan 0,7 bar dilakukan secara *intermittent* selama 9 hari. Hal tersebut menyebabkan terjadinya kenaikan nilai fluks pada jam tertentu akibat pengoprasian awal tekanan. Pada saat operasi tekanan 0,7 bar penurunan tekanan operasi secara keseluruhan cukup stabil. Tekanan operasi menurun dari penyetingan awal tekanan sebesar 0,7 bar menurun hingga menjadi 0,6 bar selama 55 jam. Lama operasi yang mampu dicapai oleh membran dengan tekanan 0,7 bar adalah 55 jam. Hal ini menandakan bahwa kondisi operasi membran bekerja secara optimal pada tekanan 0,7 bar. Permeabilitas dan tekanan membran lebih stabil terhadap pengotoran yang terjadi pada permukaan membran, sehingga dapat mencegah terjadinya *fouling* dan memperpanjang waktu operasi membran.

c. Analisis Pengaruh Variasi Tekanan 0,6 bar Terhadap Fluks dan Lama Operasi

Ketika membran dioperasikan dengan dengan tekanan 0,6 bar, nilai fluks rata-rata yang didapatkan pada jam ke-0 sebesar 82 L/m².jam dan nilai fluks pada jam terakhir yang tercapai sebesar 28 L/m².jam. Pada saat pengukuran fluks jam terakhir dengan tekanan 0,6 bar, efluen yang dihasilkan oleh membran terasa panas dikarenakan melewati pompa. Hal ini terjadi karena pada tekanan 0,6 bar pompa telah bekerja secara maksimal untuk menghisap air umpan agar dapat melewati membran. Permeabilitas membran yang rendah terjadi akibat adanya retensi partikel pengotor yang menyebabkan tekanan menurun dan air umpan menjadi sulit dilewatkan pada membran (Mulder, 1996). Penurunan nilai fluks yang terjadi pada tekanan ini juga lebih cepat dibandingkan variasi lainnya. Hal ini dikarenakan permukaan membran telah tersumbat oleh pengotor sehingga dibutuhkan tekanan operasi yang lebih tinggi untuk dapat meningkatkan nilai fluks (Wang *et al.*, 2011). Lama operasi yang mampu dicapai oleh membran dengan tekanan 0,6 bar adalah 11 jam. Nilai rata-rata fluks yang didapatkan selama operasi membran dengan tekanan 0,6 bar yaitu sebesar 49,78 L/m².jam dan volume permeate total yang dihasilkan sebesar 82,14 L.



Gambar 4.17 Pengaruh Variasi Tekanan 0,6 bar Terhadap Nilai Fluks

Pengukuran kuantitas pada tekanan 0,6 bar dilakukan secara *intermittent* selama 2 hari. Hal tersebut menyebabkan terjadinya kenaikan nilai fluks pada jam ke 86 akibat pengoprasian awal tekanan. Ketika beroperasi pada tekanan 0,6 bar, terjadi penurunan tekanan operasi dari penyetingan awal tekanan sebesar 0,6 bar menurun hingga menjadi 0,55 bar selama 11 jam. Penurunan tekanan operasi dan fluks yang dihasilkan terjadi karena adanya penyumbatan oleh partikel pengotor pada pori-pori membran yang disebut fouling (Goh *et al.*, 2018). Sehingga pada kondisi operasi dengan tekanan 0,6 bar kurang optimal dalam mencegah terjadinya fouling pada membran.

Berdasarkan data analisis ketiga variasi tekanan terhadap nilai fluks membran, diketahui bahwa permeabilitas sangat dipengaruhi oleh jumlah pori, ukuran pori, serta tekanan yang dioperasikan membran. Pengaturan tekanan operasi yang dilakukan pada *range* 0,6-0,9 bar memberikan pengaruh terhadap nilai fluks yang dihasilkan pada membran keramik mikrofiltrasi terendam yang digunakan. Selama operasi tekanan 90 jam dapat disimpulkan bahwa, semakin tinggi tekanan operasi yang digunakan maka semakin besar nilai fluks yang dihasilkan. Tetapi nilai fluks akan semakin menurun dengan cepat seiring dengan waktu karena adanya fenomena fouling (Mulder, 1996; Riduan, 2003). Pada kondisi membran mikrofiltrasi terendam yang diterapkan pada unit sedimentasi IPAM PDAM Ngagel III, kondisi tekanan optimal dengan nilai fluks yang stabil dan waktu operasi yang panjang terjadi pada tekanan 0,7 bar. Penerapan tekanan yang optimal mampu mengurangi pengotoran pada membran sehingga permeabilitas membran tetap stabil (Goh *et al.*, 2018).

4.3 Analisis Pengaruh *Spacer* Terhadap Kinerja *Immersed Membrane* Mikrofiltrasi Pada Unit Sedimentasi IPAM PDAM Ngagel III

Penelitian ini menguji pengaruh pemberian *spacer* terhadap kinerja membran mikrofiltrasi berbahan keramik secara terendam pada unit sedimentasi IPAM PDAM Ngagel III. *Spacer* merupakan sekat yang digunakan sebagai pengatur jarak antar membran. Pada umumnya penggunaan *spacer* diterapkan pada membran dengan konfigurasi *plate-frame* atau pada modul membran tubular (Redjeki, 2011; Wenten *et al.*, 2010; Wenten *et al.*, 2012). Pengujian *spacer* pada membran mikrofiltrasi terendam dilakukan dengan maksud sebagai upaya mitigasi fenomena fouling pada membran melalui pengaturan hidrodinamika yang terjadi pada membran (Goh *et al.*, 2018). Konfigurasi *spacer* yang diterapkan pada membran oleh morfologi, material, jarak, geometri, ketebalan serta sudut internal *spacer* yang digunakan mampu memberikan pengaruh terhadap kinerja membran (Kerdi *et al.*, 2020). Pada penelitian

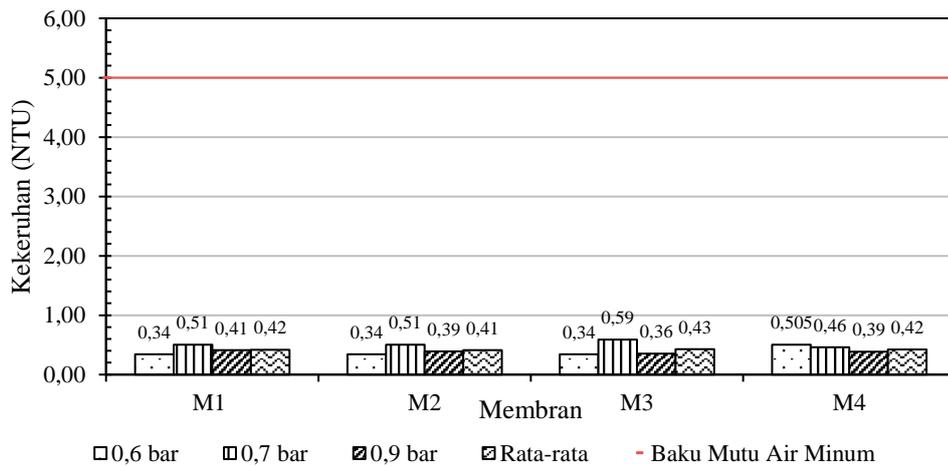
ini pemberian *spacer* pada membran divariasikan berdasarkan sudut kemiringannya, yaitu dengan tanpa *spacer* (M1), kemiringan *spacer* 90° (M2), kemiringan *spacer* 75° (M3) dan kemiringan *spacer* 105° (M4). Sudut kemiringan pada *spacer* ditentukan berdasarkan titik acuan pada dasar reaktor. Kemiringan sudut kontak pada *spacer* akan mempengaruhi luas bidang aliran air umpan yang akan melewati membran. Konfigurasi *spacer* yang digunakan adalah plat dengan bahan akrilik. *Spacer* dipasang pada slot reaktor membran terendam untuk menciptakan kondisi variasi penelitian. Air akan masuk melalui bagian bawah reaktor terendam sehingga akan melewati bagian bawah *spacer* terlebih dahulu. Pada penelitian ini, reaktor terendam pada *spacer* hanya menampung 3 slot membran dan 6 slot *spacer*. Oleh karena itu, pengambilan data analisis pengaruh *spacer* dilakukan dengan 2 tahap, yaitu tahap 1 pengujian *spacer* M1, M2, M3 dan tahap 2 pengujian *spacer* M4. Setiap variasi *spacer* diuji dengan menggunakan 4 membran berbeda. Pada setiap kondisi variasi yang diterapkan, diambil sampel air umpan untuk mengetahui selektivitas membran mikrofiltrasi yang digunakan. Selama operasi berlangsung *spacer* diletakkan terendam bersama membran di dalam reaktor. Pencucian *spacer* dilakukan pada saat akhir percobaan secara manual.

4.3.1 Analisis Pengaruh *Spacer* Terhadap Parameter Kualitas

Pengujian kualitas permeat terhadap pengaruh pemberian *spacer* dilakukan untuk mengetahui kemampuan selektivitas membran setelah pemberian *spacer*. Selektivitas membran dipengaruhi oleh interaksi antar muka dengan spesi yang melewati membran (Notodarmojo *et al.*, 2004). Pemberian *spacer* dengan kemiringan tertentu diharapkan mampu memperluas kontak pada permukaan membran sehingga dapat mengurangi terjadinya polarisasi konsentrasi serta meningkatkan perpindahan massa pada permukaan membran (Goh *et al.*, 2018; Kim & Elimelech, 2012). Selektivitas membran diukur dengan adanya nilai koefisien rejeksi (%R) yang dihasilkan pada setiap variasi. Data hasil kualitas air yang diuji terdiri dari nilai kekeruhan, zat organik, TSS, mikroplastik, Total *coliform* dan *E. coli*. Hasil pengujian kualitas air dibandingkan dengan baku mutu pada Permenkes No. 492 Tahun 2010 tentang Persyaratan Kualitas Air Minum. Sampel yang diujikan merupakan sampel yang diambil pada saat jam terakhir operasi membran ketika *fouling*. Hal ini dapat dilakukan karena membran keramik telah terbukti memiliki kestabilan terhadap konsentrasi bahan kimia, temperatur maupun tekanan (Guerra & Pellegrino, 2013). Sampel diambil menggunakan botol PET 1,5 L, botol kaca 500 mL dan botol duran steril 100 mL.

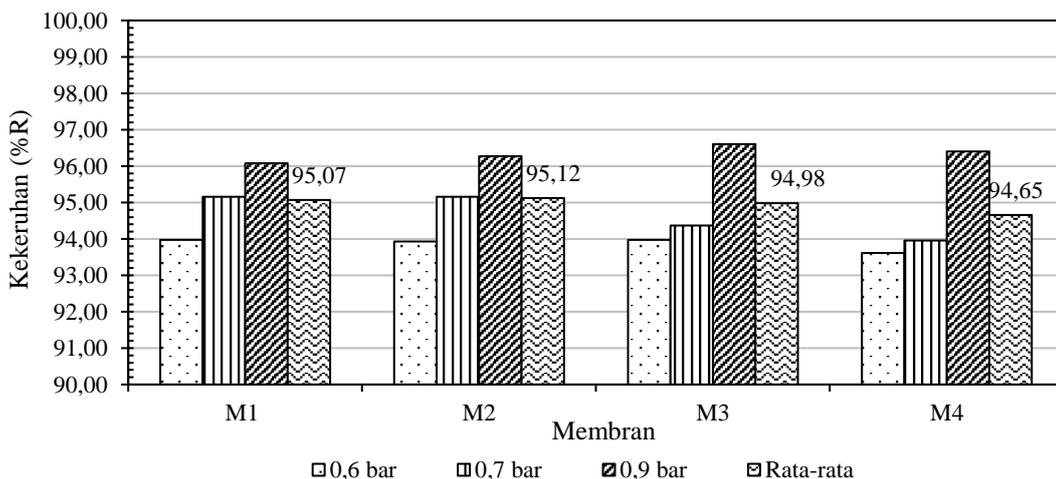
a. Analisis Pengaruh *Spacer* Terhadap Parameter Kekeruhan

Kekeruhan merupakan faktor utama yang mempengaruhi terjadinya *irreversible fouling* (Park *et al.*, 2020). Pengukuran nilai kekeruhan dilakukan dengan cara yang sama seperti pengukuran pengaruh variasi tekanan. Nilai kekeruhan permeat yang dihasilkan oleh masing-masing *spacer* seperti pada Gambar 4.18. Berdasarkan data hasil analisis nilai kekeruhan pada masing-masing membran dapat diketahui konsentrasi nilai kekeruhan tertinggi terjadi pada kondisi membran M3 dengan rata-rata nilai kekeruhan 0,43 NTU, sedangkan kekeruhan terendah terjadi pada kondisi membran M2 dengan rata-rata nilai kekeruhan 0,41 NTU. Secara keseluruhan kualitas efluen yang dihasilkan oleh membran terhadap parameter kekeruhan tidak memiliki selisih yang besar. Hal ini menandakan bahwa pemberian *spacer* tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai kekeruhan yang direjeksi. Selektivitas membran terhadap parameter kekeruhan sangat dipengaruhi oleh konsentrasi *feed* yang diolah, ukuran partikel yang disisihkan serta ukuran membran yang digunakan (Wang *et al.*, 2011)



Gambar 4.18 Pengaruh *Spacer* Terhadap Konsentrasi Efluen Kekeruhan

Nilai kekeruhan yang telah diuji dibandingkan dengan karakteristik air umpan yang diolah untuk mengetahui nilai koefisien rejeksi (%R) yang dihasilkan oleh membran. Berdasarkan data pada Gambar 4.18 diketahui bahwa nilai kekeruhan yang dihasilkan pada tiap variasi tekanan telah memenuhi baku mutu persyaratan kualitas air. Berdasarkan variasi *spacer* yang diterapkan pada membran diperoleh nilai koefisien rejeksi (%R) tertinggi terjadi pada membran M2 dengan kemiringan *spacer* 90° sebesar 95,12%. Sedangkan nilai koefisien rejeksi (%R) terendah terjadi pada membran M4 dengan kemiringan *spacer* 105° sebesar 94,65%. Hal tersebut dapat terjadi karena air yang masuk pada membran akan melewati bagian bawah *spacer* terlebih dahulu. Pada kondisi membran M2 (kemiringan 90°) memiliki jarak yang lebih sempit dibandingkan membran M4 (kemiringan 105°) sehingga kondisi kecepatan aliran *cross-flow* pada permukaan membran lebih tinggi dan mampu mengurangi pengotoran pada permukaan membran (Goh *et al.*, 2018)



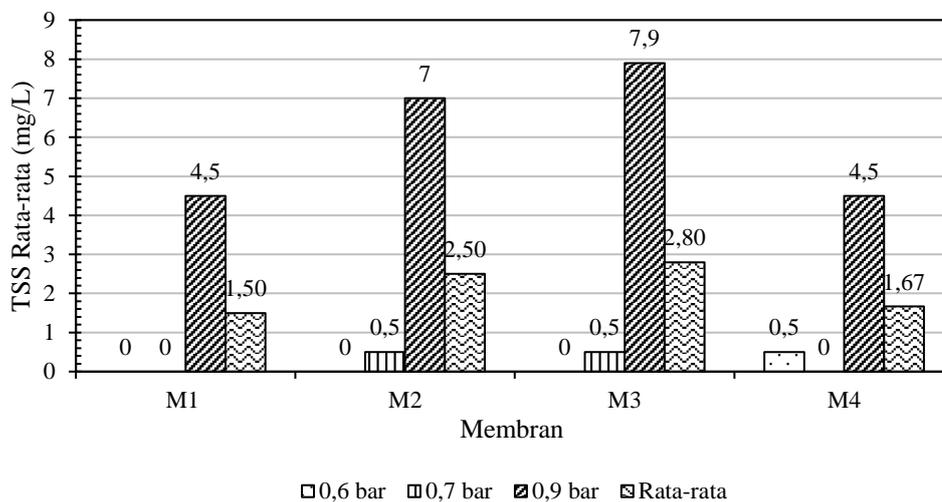
Gambar 4.19 Pengaruh *Spacer* Terhadap Nilai Koefisien Rejeksi (%R) Kekeruhan

Hasil temuan yang diperoleh berdasarkan grafik hubungan pengaruh *spacer* membran dengan nilai koefisien rejeksi rata-rata (%R) parameter kekeruhan mencapai maksimum pada membran M2 dengan kemiringan *spacer* 90° dengan nilai koefisien rejeksi rata-rata yang dihasilkan sebesar 95,12%. Hal ini membuktikan bahwa pada sudut kemiringan *spacer* 90° dengan aliran *cross-flow*, mampu menghasilkan perpindahan massa serta pencampuran

konsentrasi pada seluruh bagian permukaan membran yang lebih merata sehingga mengurangi pembentukan polarisasi konsentrasi (Goh *et al.*, 2018).

b. Analisis Pengaruh *Spacer* Terhadap Parameter TSS

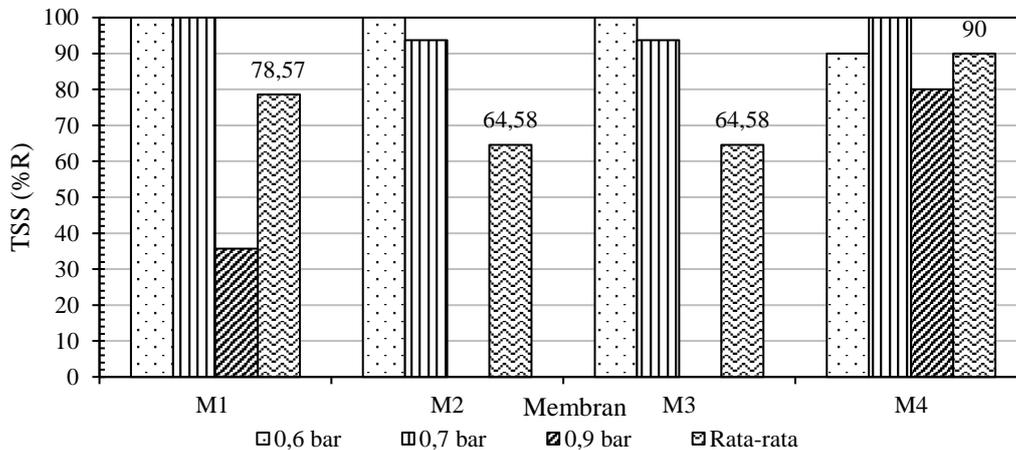
Partikel tersuspensi (TSS) merupakan partikel pengotor yang mampu mempengaruhi kondisi nilai kekeruhan pada air, tidak terlarut dan tidak mengendap secara langsung (Pramesti & Puspikawati, 2020; Suwari *et al.*, 2010). Menurut Warsinger *et al.*, (2018) padatan tersuspensi merupakan polutan konvensional yang pasti terkandung pada sumber air yang akan diolah kembali untuk air minum. Pada Kali Surabaya, kandungan TSS berkisar antara 56,67-74,67 mg/L yang mana masih melebihi baku mutu kualitas air kelas I (Suwari *et al.*, 2010). Konsentrasi partikel tersuspensi yang tinggi mampu mengurangi oksigen terlarut didalam air karena menghalangi penetrasi cahaya untuk masuk ke dalam badan air. Berdasarkan ukuran partikelnya, TSS mampu ditahan menggunakan saringan *millipore* dengan ukuran pori 0,45 μm (Said, 2018). Oleh karena itu, penerapan teknologi membran memberikan potensi yang tinggi terhadap penyisihan TSS (Mahardini & Kusuma, 2002). Selama operasi berlangsung, adanya tekanan hisap pada pompa menyebabkan partikel TSS akan terus menerus menyumbat pori-pori pada permukaan membran sehingga menyebabkan terjadinya *fouling*. *Fouling* yang disebabkan oleh partikel tersuspensi tergolong jenis *fouling* yang sulit dihilangkan secara fisik (*irreversible fouling*) (Kramer *et al.*, 2020). Partikel tersuspensi dapat melayang didalam air dan mudah terbawa oleh aliran air (Suhendar *et al.*, 2020). Dengan pemberian variasi kemiringan *spacer* pada membran, diharapkan mampu menangkap partikel tersuspensi yang melayang agar terakumulasi pada *spacer* sehingga dapat jatuh terendapkan oleh gravitasi. Berdasarkan hasil analisis efluen yang dihasilkan oleh membran, didapatkan konsentrasi TSS rata-rata terendah sebesar 1,5 mg/L yang terjadi pada kondisi membran M1 dengan tanpa *spacer*.



Gambar 4.20 Pengaruh *Spacer* Terhadap Konsentrasi Efluen TSS

Hasil temuan pada grafik diatas membuktikan bahwa pemberian *spacer* mampu merubah lintasan aliran partikel sehingga jumlah partikel dapat terakumulasi semakin besar (Pratiwi & Hermana, 2014). Namun pada kondisi *spacer* kemiringan *spacer* 90° dan 75° arah partikel telah berubah untuk lebih cepat mengarah pada membran. Hal ini dapat diketahui berdasarkan peningkatan konsentrasi TSS yang mampu lolos pada kondisi membran M2 dan M3. Dibandingkan membran kondisi M1 dan M4, jarak *spacer* dan membran pada inlet reaktor

terendam lebih lebar dibandingkan jarak *spacer* pada kondisi membran M2 dan M3. Hal ini menyebabkan akumulasi kandungan TSS meningkat sehingga tekanan pada kondisi membran M2 dan M3 lebih cepat menurun karena adanya penyumbatan pori membran (Goh *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2011). Maka dapat disimpulkan bahwa semakin miring sudut kontak yang diterapkan pada *spacer*, dan semakin kecil jarak antar *spacer* dan membran akan menyebabkan semakin tinggi konsentrasi TSS yang mampu lolos melalui membran.



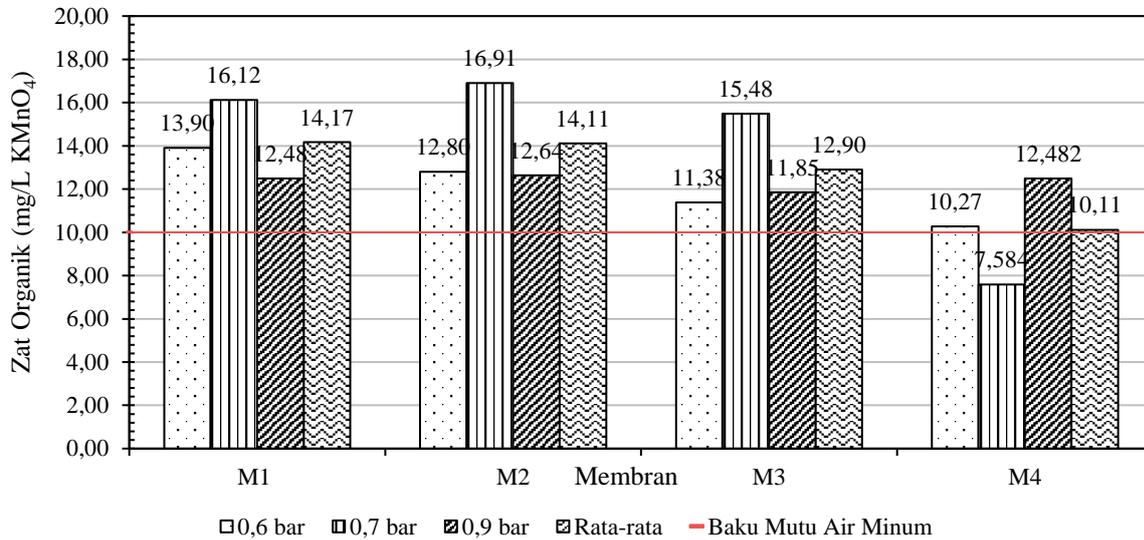
Gambar 4.21 Pengaruh *Spacer* Terhadap Nilai Koefisien Rejeksi (%R) TSS

Apabila dibandingkan dengan kualitas air umpan yang diolah, maka koefisien rejeksi yang dihasilkan pada membran sudah cukup tinggi. Berdasarkan hasil analisis pada variasi kemiringan *spacer* yang digunakan, nilai koefisien rejeksi (%R) rata-rata tertinggi yang tercapai untuk menyisihkan TSS pada air umpan sebesar 90% pada kondisi membran M4 dengan kemiringan *spacer* 105°, sedangkan nilai rejeksi (%R) rata-rata terendah sebesar 64,58% didapatkan pada kondisi membran M2 dan M3. Hal ini membuktikan bahwa selektivitas membran mencapai optimum pada kondisi membran M4 dikarenakan akumulasi tingkat pengotoran yang tinggi pada permukaan membran menyebabkan ukuran pori membran semakin mengecil. Oleh karena itu, partikel TSS yang mampu melalui membran memiliki ukuran yang lebih kecil dan lebih sedikit (Wang *et al.*, 2011). Aliran *cross-flow* yang berlawanan dengan arah kemiringan *spacer* akan menghambat aliran air yang datang sehingga mampu mengakumulasi deposisi partikel pada permukaan membran (Zamani *et al.*, 2017)

c. Analisis Pengaruh *Spacer* Terhadap Parameter Zat Organik

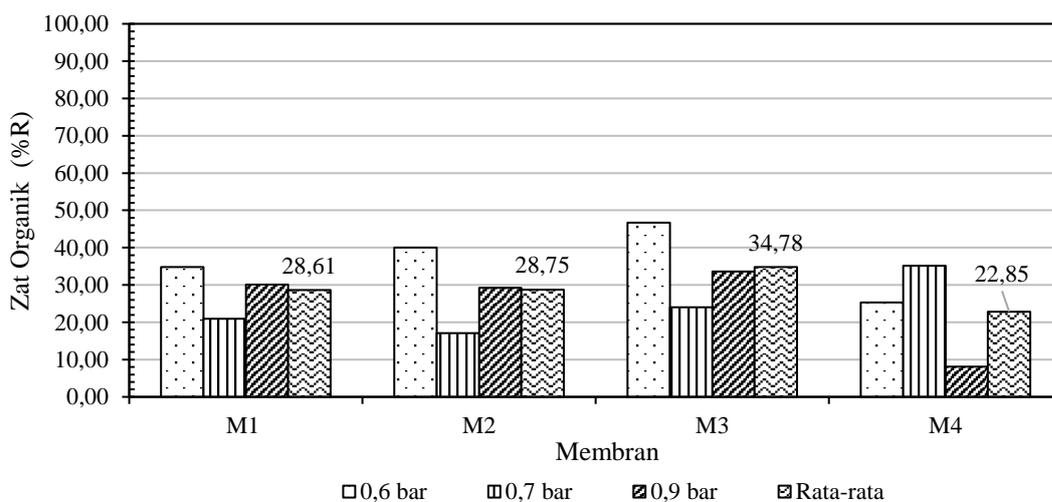
Air umpan (*feed*) dapat mengandung partikel berbau organik dan anorganik. Keberadaan zat organik dapat diidentifikasi bersama dengan parameter fisik lainnya seperti kekeruhan dan TSS (Park *et al.*, 2020). Dalam penerapan teknologi membran mikrofiltrasi terendam jangka panjang, adanya kandungan zat organik pada air umpan mampu menyebabkan *irreversible fouling* pada permukaan membran (Yamamura *et al.*, 2007). Pemberian *spacer* pada membran merupakan upaya untuk menahan terjadinya fenomena fouling, sehingga masa pakai membran menjadi lebih lama dan intensitas pencucian menjadi lebih sedikit (Goh *et al.*, 2018). Analisis zat organik pada sampel air umpan dan efluen membran dilakukan menggunakan metode nilai permanganat. Berdasarkan hasil analisis parameter zat organik pada kondisi variasi kemiringan *spacer*, secara keseluruhan sebagian besar hasil efluen yang didapatkan masih belum memenuhi baku mutu Peraturan Menteri Kesehatan RI No. 492 Tahun 2010 yaitu dengan batas konsentrasi zat organik dalam KMnO₄ sebesar 10 mg/L. Berdasarkan data konsentrasi efluen membran pada Gambar 4.22 diketahui bahwa nilai konsentrasi terendah terjadi pada membran M4 dengan kemiringan *spacer* 105° dengan rata-rata sebesar 10,11 mg/L

KMnO₄. Pada kondisi membran M4 dengan tekanan 0,7 bar konsentrasi zat organik yang dihasilkan sebesar 7,58 mg/L KMnO₄ yang mana telah memenuhi baku mutu. Konsentrasi efluen zat organik tertinggi terjadi pada membran M1 dengan rata-rata sebesar 14,17 mg/L KMnO₄.



Gambar 4.22 Pengaruh *Spacer* Terhadap Konsentrasi Efluen Zat Organik

Penurunan konsentrasi zat organik pada membran M4 dapat terjadi karena pada kemiringan 105° dengan *spacer* membentuk huruf “A”. Konsentrasi zat organik yang masuk melalui bagian bawah reaktor akan tertahan pada *spacer*. Akumulasi tingkat pengotoran yang tinggi pada permukaan membran menyebabkan ukuran pori membran semakin mengecil. Oleh karena itu, partikel zat organik yang mampu melalui membran memiliki ukuran yang lebih kecil dan lebih sedikit (Wang *et al.*, 2011). Bak sedimentasi memiliki kandungan mikroorganisme dan dosis koagulan yang mampu merubah bentuk (*transform*) partikel zat organik menjadi suspensi yang lebih kecil sehingga mampu mereduksi zat organik yang tertahan pada *spacer* dan mengurangi pengotoran di permukaan membran (Ariyanti *et al.*, 2020; Gray, 2014).

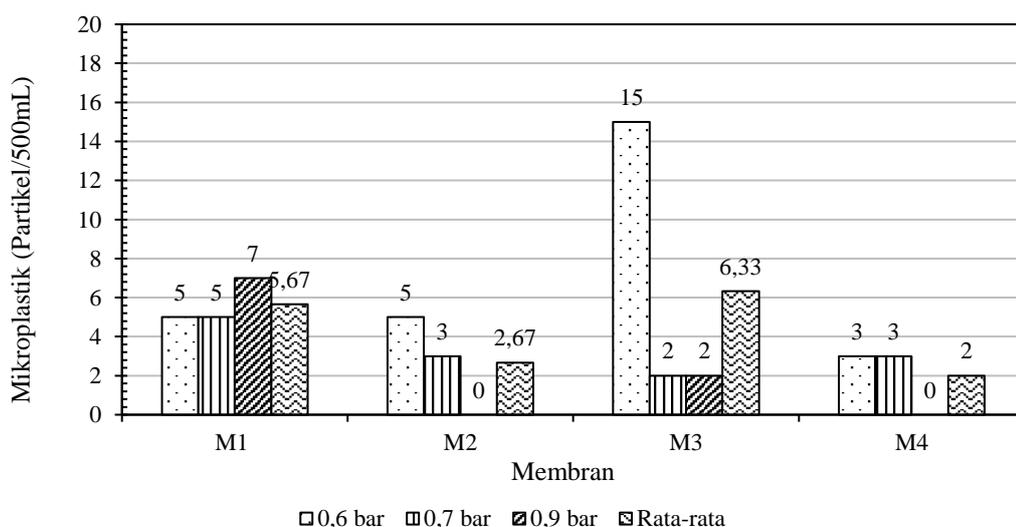


Gambar 4.23 Pengaruh *Spacer* Terhadap Nilai Koefisien Rejeksi (%R) Zat Organik

Berdasarkan Gambar 4.23 nilai koefisien rejeksi (%R) parameter zat organik secara keseluruhan masih rendah. Hal ini disebabkan karena membran mikrofiltrasi maupun ultrafiltrasi tidak mampu menyisahkan partikel organik maupun inorganik yang terlarut sebelum diubah bentuknya menjadi partikel tersuspensi (Gray, 2014). Selain itu konsentrasi bahan organik terlarut yang lebih tinggi dibandingkan bahan organik tidak terlarut, dengan ukuran $>0,5 \mu\text{m}$ juga mempengaruhi efisiensi penyisihan yang dihasilkan oleh membran mikrofiltrasi terendam (Santoso, 2018). Berdasarkan hasil analisis pada variasi kemiringan *spacer* yang digunakan, nilai koefisien rejeksi (%R) rata-rata tertinggi yang tercapai sebesar 34,78% pada kondisi membran M3 dengan kemiringan 75° , sedangkan nilai rejeksi (%R) rata-rata terendah sebesar 22,85% didapatkan pada kondisi membran M4. Hal ini membuktikan bahwa selektivitas membran terhadap parameter zat organik sangat dipengaruhi oleh konsentrasi *feed* yang diolah serta kondisi operasi membran (Wang *et al.*, 2011)

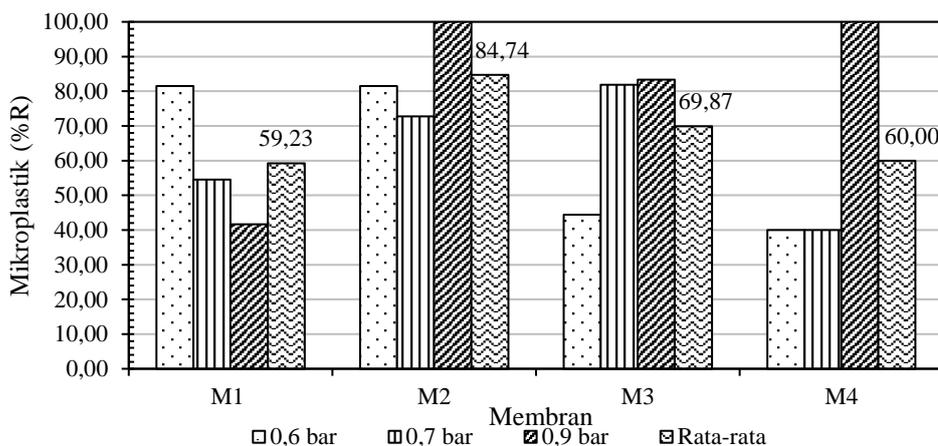
d. Analisis Pengaruh *Spacer* Terhadap Parameter Mikroplastik

Kelimpahan mikroplastik yang telah ditemukan pada permukaan air memiliki potensi yang tinggi untuk masuk ke dalam instalasi pengolahan air minum (Lestari *et al.*, 2020). Ukuran partikel mikroplastik yang ditemukan pada instalasi air minum yang dengan air baku berasal dari sungai berkisar antara <1 hingga $>100 \mu\text{m}$. Ukuran mikroplastik yang sangat kecil menyebabkan penyisihan mikroplastik yang mampu diolah pada instalasi pengolahan air minum konvensional hanya sebesar 76,1% dari kelimpahan yang ada pada air baku. Setiap unit instalasi pengolahan air minum memiliki efisiensi yang berbeda. Efisiensi yang mampu dicapai pada unit prasedimentasi hanya sebesar 33,33%, sedangkan pada unit koagulasi-flokulasi dan sedimentasi, kelimpahan mikroplastik cenderung meningkat karena adanya gesekan antara dosis koagulan dengan partikel pasir dan lainnya (Mar'atusholihah *et al.*, 2020; Pivokonsky *et al.*, 2018). Prinsip penyisihan parameter mikroplastik pada membran didasarkan pada ukuran partikel yang akan dipisahkan (*size exclusion*) atau berdasarkan transport saringan (*sieving*) seperti pada parameter lainnya (Wang *et al.*, 2011). Berdasarkan data pada Gambar 4.24 dapat diketahui bahwa nilai konsentrasi mikroplastik terendah terjadi pada kondisi membran M4 pada kemiringan *spacer* 105° dengan rata-rata 2 partikel/500mL, sedangkan nilai konsentrasi mikroplastik tertinggi terjadi pada membran M3 dengan kemiringan *spacer* 75° dengan rata-rata 6,33 partikel/500mL.



Gambar 4.24 Pengaruh *Spacer* Terhadap Konsentrasi Efluen Mikroplastik

Berdasarkan Gambar 4.24 data analisis efluen parameter mikroplastik oleh membran terjadi peningkatan rata-rata partikel mikroplastik pada membran M3 dengan kondisi kemiringan *spacer* 75°. Mikroplastik memiliki sifat waktu tinggal yang lama, stabilitas tinggi, serta berpotensi terfragmentasi menjadi partikel yang lebih kecil dan menyerap kontaminan lainnya (Padervand *et al.*, 2020). Hal tersebut membuktikan pada kondisi membran M3 kemiringan *spacer* yang diterapkan menyebabkan partikel mikroplastik terfragmentasi menjadi lebih kecil karena adanya gesekan yang lebih tinggi dengan laju aliran yang semakin rendah ketika melewati *spacer*. Laju aliran yang turbulen pada inlet aliran air dalam reaktor menyebabkan partikel mikroplastik sulit mengendap. Oleh karena itu, konsentrasi partikel mikroplastik yang tinggi dapat terjebak pada *spacer* dan berpotensi untuk lolos melalui membran (Goh *et al.*, 2018; Mar'atusholihah *et al.*, 2020).



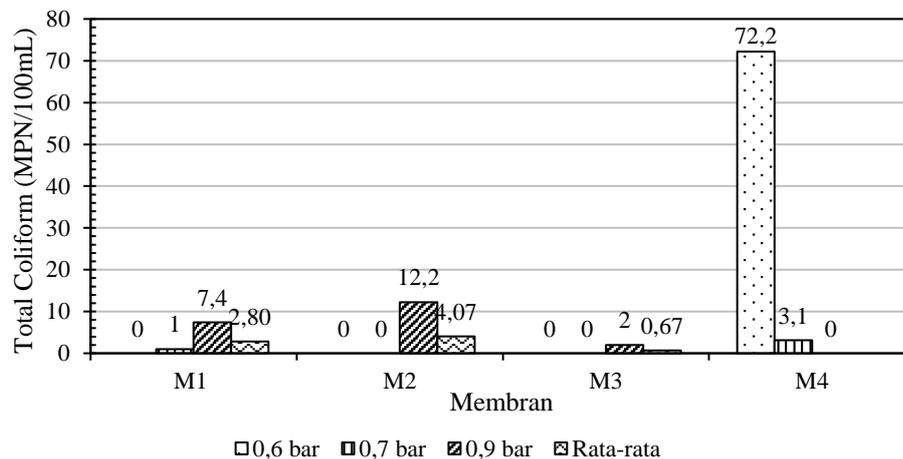
Gambar 4.25 Pengaruh *Spacer* Terhadap Nilai Koefisien Rejeksi (%R) Mikroplastik

Apabila dibandingkan dengan kualitas air umpan yang diolah, maka koefisien rejeksi rata-rata yang dihasilkan pada membran mikrofiltrasi *flat-sheet* tergolong rendah dibandingkan hasil penelitian penyisihan mikroplastik pada literatur lainnya (Padervand *et al.*, 2020; Pizzichetti *et al.*, 2021). Berdasarkan hasil analisis pada variasi kemiringan *spacer* yang digunakan, nilai koefisien rejeksi (%R) rata-rata tertinggi yang tercapai untuk menyisihkan mikroplastik pada air umpan sebesar 84,74% pada kondisi membran M2 dengan kemiringan *spacer* 90°, sedangkan nilai rejeksi (%R) rata-rata terendah sebesar 59,23% didapatkan pada kondisi membran M1 dengan konfigurasi tanpa *spacer*. Hal ini membuktikan bahwa selektivitas membran mencapai optimum pada kondisi membran M2 dikarenakan kemiringan *spacer* 90° menciptakan jarak yang cukup dekat dengan membran. Potensi terjadinya kontak polutan yang lebih merata dan meningkatkan akumulasi polutan lainnya sangat tinggi. Salah satu polutan yang terakumulasi adalah mikroorganisme. Efisiensi membran dalam penyisihan mikroorganisme yang tinggi menandakan konsentrasi mikroorganisme pada permukaan membran cukup tinggi. Dengan adanya mikroorganisme, degradasi polimer plastik dapat terjadi secara biofragmentasi karena mikroorganisme mampu memproduksi enzim cutinase yang dapat memecah ikatan polimer pada plastik (Goh *et al.*, 2018; Mahardini & Kusuma, 2002; Mar'atusholihah *et al.*, 2020).

e. Analisis Pengaruh *Spacer* Terhadap Parameter Total *coliform* dan *E. coli*

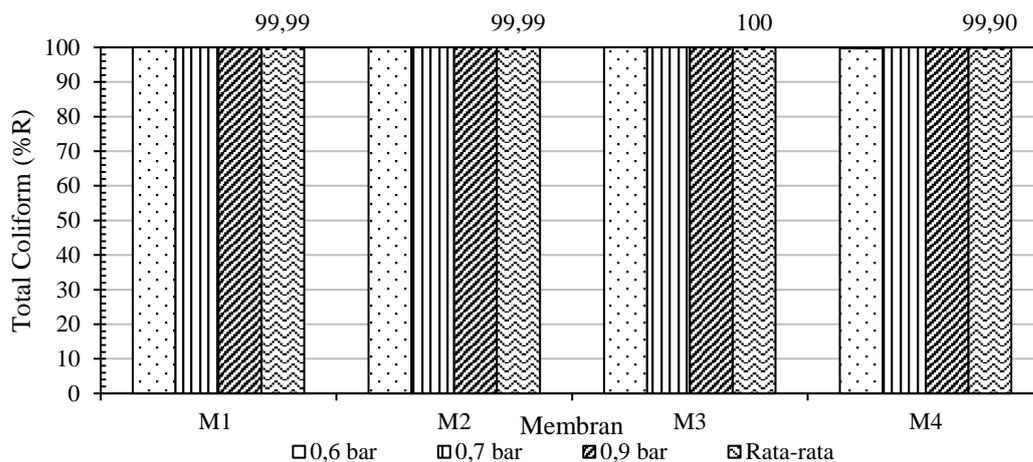
Total *Coliform* dan *E. coli* merupakan mikroorganisme patogen yang harus disisihkan dalam pengolahan air minum menurut Permenkes No. 492 Tahun 2010. *Coliform* merupakan jasad yang ditemukan pada tinja manusia dan tinggal di dalam usus manusia/hewan berdarah panas sebagai indikator kualitas mikrobiologis. Mikroorganisme virus dan bakteri mampu

melekat pada partikel tersuspensi yang terkandung pada air (Park *et al.*, 2020). Konsentrasi mikroorganisme yang tinggi mampu menyebabkan terjadinya biofouling. Biofouling disebabkan oleh akumulasi pertumbuhan spesies biologis yang mempengaruhi permeabilitas dan produktivitas membran (Nainggolan, 2015). Berdasarkan penelitian Said & Hartaja, (2018) kondisi kualitas air baku pada Instalasi Pengolahan Air Minum Ngagel mengandung bakteri total *coliform* dan *E.coli* yang melebihi baku mutu air kelas I dan II, sehingga diperlukan jumlah khlor cukup tinggi ketika proses desinfeksi. Menurut Warsinger *et al.*, (2018) membran mikrofiltrasi mampu menyisihkan protozoa, *cyst*, dan bakteri *coliform* hingga 99,99% dari filtrat. Prosedur analisis total *coliform* dan *E. coli* dalam penelitian ini dilakukan menggunakan metode Idexx Colilert. Secara keseluruhan, sebagian besar sampel total *coliform* telah memenuhi baku mutu yaitu 0 MPN/100 mL. Berdasarkan data pada Gambar 4.26 pemberian *spacer* dengan variasi kemiringan pada membran memberikan hasil konsentrasi rata-rata total *coliform* terendah sebesar 0,67 MPN/100 mL pada variasi membran M3 dengan kemiringan *spacer* 75°, sedangkan konsentrasi total *coliform* rata-rata tertinggi sebesar 25,10 MPN/100 mL. Kecacatan permukaan membran karena adanya biofouling serta pengemasan modul membran yang tidak sempurna mampu menyebabkan bakteri lolos melalui membran (Warsinger *et al.*, 2018)



Gambar 4.26 Pengaruh *Spacer* Terhadap Konsentrasi Efluen Total *Coliform*

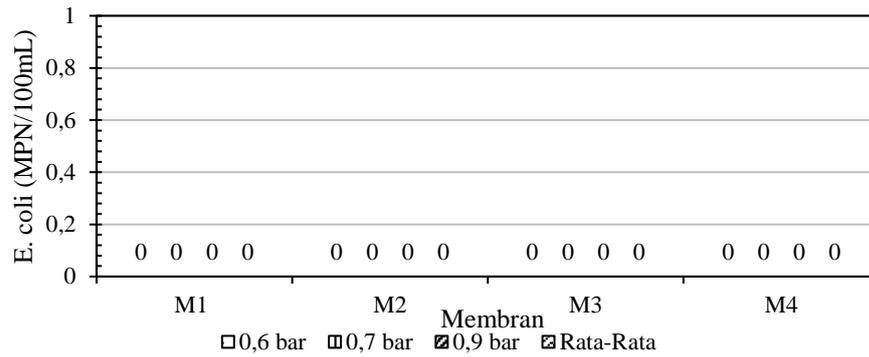
Peningkatan konsentrasi total coliform pada membran M4 dapat terjadi karena pada kemiringan 105° dengan *spacer* membentuk huruf “A”, konsentrasi *coliform* yang masuk melalui bagian bawah reaktor cenderung laminar sehingga dapat menyebabkan konsentrasi *coliform* tertahan pada *spacer*. Dengan laju aliran yang laminar, potensi pengotoran yang tidak merata pada permukaan membran cenderung meningkat. Oleh karena itu, konsentrasi *coliform* yang tinggi pada membran M4 dapat diindikasikan terjadinya biofouling pada membran (Goh *et al.*, 2018; Nainggolan, 2015)



Gambar 4.27 Grafik Pengaruh *Spacer* Terhadap Nilai Koefisien Rejeksi (%R) Total *Coliform*

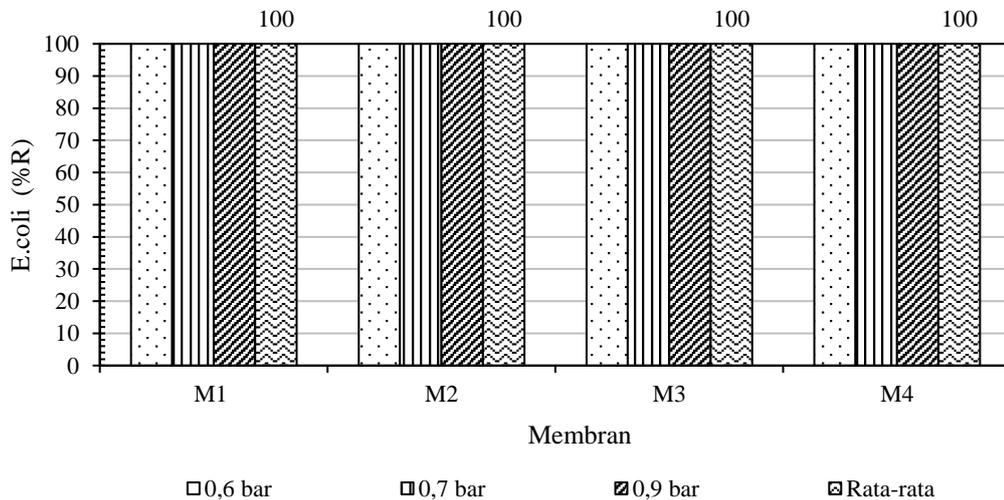
Berdasarkan Gambar 4.27 nilai koefisien rejeksi (%R) parameter total *coliform* secara keseluruhan sangat tinggi. Hal ini disebabkan diameter total *coliform* pada air berkisar antara $0,5 \times 0,3 \mu\text{m}$ (Nurtsani, 2018). Selain itu ukuran pori membran dan kualitas air umpan juga mempengaruhi hasil penyisihan membran terhadap parameter total *coliform* (Wang *et al.*, 2011). Berdasarkan hasil analisis selektivitas membran pada variasi kemiringan *spacer* yang digunakan, nilai koefisien rejeksi (%R) rata-rata tertinggi tercapai sebesar 100% pada kondisi membran M3 dengan kemiringan 75° . Peningkatan rejeksi total *coliform* pada membran M3 dapat terjadi karena pada kemiringan 75° dengan *spacer* membentuk huruf “V”, konsentrasi *coliform* yang masuk melalui bagian bawah reaktor akan terdorong dengan laju aliran *cross-flow* yang tinggi dan tertahan pada *spacer*. Jarak yang sempit pada bagian bawah *spacer* mampu meningkatkan turbulensi air umpan yang masuk sehingga akumulasi konsentrasi *coliform* menjadi rata dan mengurangi polarisasi konsentrasi *coliform* pada membran (Redjeki, 2011; Wu *et al.*, 2019). Nilai rejeksi (%R) rata-rata terendah sebesar 99,90% didapatkan pada kondisi membran M4. Hal ini membuktikan pernyataan (Warsinger *et al.*, 2018) bahwa kemampuan membran mikrofiltrasi untuk menyisihkan bakteri *coliform* berkisar antara 99,99%.

Pada hasil analisis efluen membran terhadap parameter *E. coli* dapat diketahui bahwa kandungan *E. coli* pada setiap variasi kemiringan *spacer* telah memenuhi baku mutu yang berlaku yaitu 0 MPN/100 mL. Hasil ini sejalan dengan penelitian membran yang telah dilakukan oleh Al-Shammari *et al.*, (2012) dan penelitian Mahardini & Kusuma, (2002) terhadap penyisihan *E. coli* yang mana seluruh kandungan *E. coli* dapat disisihkan 100%. Penyisihan parameter *E. coli* yang didasarkan pada ukuran partikel yang akan dipisahkan (*size exclusion*) atau berdasarkan transport saringan (*sieving*) membuktikan bahwa ukuran *E. coli* pada air umpan yang disisihkan berkisar antara $1-1,5 \mu\text{m} \times 2-6 \mu\text{m}$ (Nurtsani, 2018; Wang *et al.*, 2011)



Gambar 4.28 Pengaruh *Spacer* Terhadap Konsentrasi Efluen *E. coli*

Apabila dibandingkan dengan kualitas *feed* yang diolah, maka diketahui nilai koefisien rejeksi (%R) yang didapatkan pada seluruh variasi *spacer* sebesar 100%. Hal ini membuktikan bahwa bakteri *E. coli* memiliki ukuran lebih besar dibanding ukuran pori membran yang digunakan ($>0,05 \mu\text{m}$) sehingga mampu ditahan oleh pori membran mikrofiltrasi.



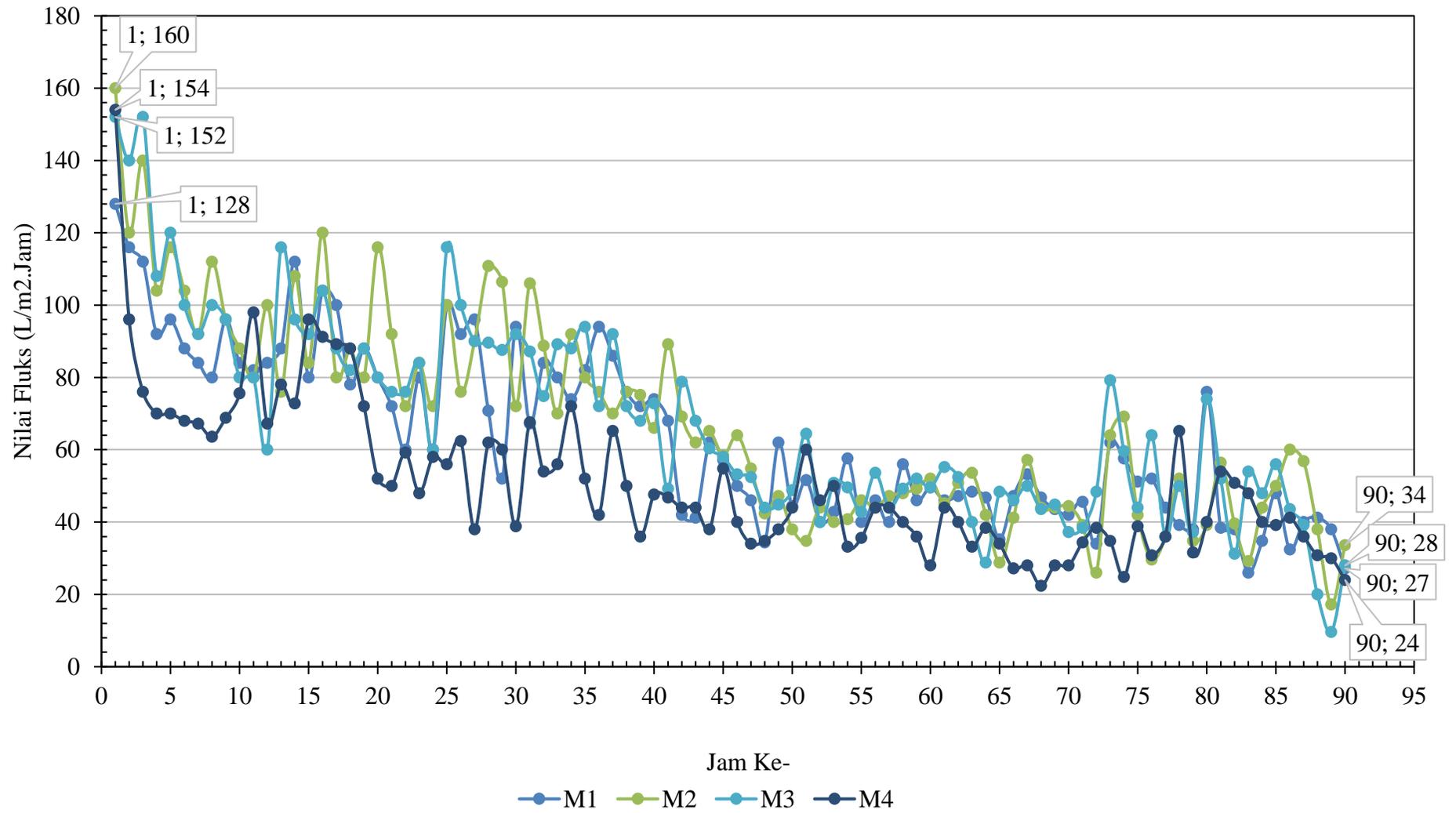
Gambar 4.29 Pengaruh *Spacer* Terhadap Nilai Koefisien Rejeksi (%R) *E. coli*

Keempat variasi kemiringan *spacer* dalam penyisihan total *coliform* dan *E. coli* memberikan hasil yang signifikan terhadap kinerja membran yang digunakan. Penyisihan bakteri *coliform* dan *E. coli* sangat dipengaruhi oleh ukuran pori membran yang digunakan (Gray, 2014). Hal ini dikarenakan spesifikasi membran mikrofiltrasi *flat-sheet* terendam yang digunakan memiliki ukuran pori sangat kecil ($0,05 \mu\text{m}$) sehingga sangat andal dalam menahan retensi kandungan *E. coli* pada air umpam dengan kondisi aliran yang bervariasi (Guerra & Pellegrino, 2013). Dengan demikian disimpulkan bahwa kinerja membran mikrofiltrasi terendam yang diimplementasikan pada unit sedimentasi PDAM Ngagel III dengan variasi kemiringan *spacer* tidak memberikan pengaruh terhadap parameter total *coliform* dan *E. coli*.

4.3.2 Analisis Pengaruh *Spacer* Terhadap Parameter Kuantitas

Parameter kuantitas pada membran diuji berdasarkan efluen produk permeal yang dihasilkan setiap kondisi variasi *spacer* dilakukan pada membran untuk mengetahui permeabilitas membran. Permeabilitas pada membran diukur untuk mengetahui kecepatan kinerja membran dalam melewati suatu spesi dari membran. Penambahan *spacer* merupakan salah satu pengaturan kondisi hidrodinamika pada membran untuk memanipulasi turbulensi aliran dan fluks sehingga mampu meningkatkan laju filtrasi pada membran (Goh *et al.*, 2018). Penambahan *spacer* telah digunakan pada penelitian membran untuk memperluas pencampuran *feed* pada permukaan membran, meningkatkan transport massa yang melewati membran, meminimalisir tekanan yang hilang, meminimalisir pengotoran dan penyumbatan pori membran serta mencegah terjadinya konsentrasi pada permukaan membran (Fritzmann *et al.*, 2013; Redjeki, 2011). Dengan melewati air umpan pada celah diantara *spacer* dan permukaan membran, turbulensi aliran pada membran mampu meningkatkan permeabilitas membran. Dalam percobaan Rahmawati *et al.*, (2019) menggunakan *spacer* bersirip dengan konfigurasi sudut sirip 45° mampu meningkatkan permeabilitas membran hingga 87%. Orientasi sudut pada *spacer* juga mampu meningkatkan perpindahan massa pada membran (Taamneh & Bataneh, 2017). Dalam penelitian ini, parameter kuantitas yang diukur terhadap variasi pemberian *spacer* adalah fluks, volume permeal dan lama waktu operasi. Salah satu strategi yang berhasil diterapkan untuk menjaga fluks tetap stabil adalah dengan pemberian sekat (*spacer*) pada membran (Rahmawati *et al.*, 2021).

Pengujian kuantitas membran terhadap variasi *spacer* dinyatakan terhadap nilai fluks yang dihasilkan oleh masing-masing kondisi membran. Fluks merupakan jumlah volume permeal yang melewati satu luasan membran pada waktu tertentu (Mulder, 1996). Luas membran mikrofiltrasi terendam yang digunakan adalah $0,15 \text{ m}^2$. Hasil pengukuran kuantitas efluen dibandingkan pada setiap variasi yang dilakukan. Pengukuran fluks pada penelitian ini dilakukan *on-site* secara manual menggunakan gelas ukur dan *timer*. Sampel fluks yang diukur merupakan sampel yang diambil pada setiap jam hingga jam terakhir operasi membran ketika fouling. Untuk membuktikan adanya pengaruh pemberian *spacer* terhadap aliran pada permukaan membran, dilakukan juga perhitungan turbulensi aliran menggunakan bilangan Reynold. Berdasarkan hasil nilai fluks terhadap variasi *spacer* yang diuji pada Gambar 4.30, diketahui bahwa penurunan fluks pada keempat membran terjadi selama 90 jam. Pada jam ke-1 nilai fluks tertinggi tercapai sebesar $160 \text{ L/m}^2 \cdot \text{jam}$ pada kondisi membran M2 dengan kemiringan 90° , sedangkan nilai fluks terendah pada jam ke-1 sebesar $128 \text{ L/m}^2 \cdot \text{jam}$ terjadi pada membran M1 dengan kondisi tanpa *spacer*. Pada jam ke-90 nilai fluks tertinggi terjadi pada kondisi membran M2 sebesar $34 \text{ L/m}^2 \cdot \text{jam}$ dan yang terendah pada kondisi membran M1 sebesar $24 \text{ L/m}^2 \cdot \text{jam}$. Hal ini membuktikan bahwa penambahan *spacer* dengan mampu meningkatkan permeabilitas membran sehingga nilai fluks yang dihasilkan meningkat (Goh *et al.*, 2018).



Gambar 4.30 Pengaruh *Spacer* Terhadap Nilai Fluks

Berdasarkan data pada Gambar 4.30 dapat dibuktikan bahwa laju fluks akan menurun seiring dengan waktu (*irreversible*) akibat adanya polarisasi konsentrasi, adsorpsi, kompaksi dan *fouling* yang terjadi pada permukaan membran (Wenten *et al.*, 2013). Penurunan nilai fluks yang terjadi pada saat operasi membran merupakan indikasi terjadinya *fouling*. Ketika *fouling*, partikel pengotor akan memperkecil ukuran pori membran sehingga permeabilitas membran menjadi menurun (Mulder, 1996). Lama operasi yang mampu dicapai oleh membran tiap variasi *spacer* adalah 90 jam. Berdasarkan Gambar 4.30 diketahui nilai fluks yang dihasilkan ketika operasi berlangsung pada setiap jam. Pengukuran fluks pada tiap variasi *spacer* dilakukan selama 12 hari dengan sistem *intermittent*. Hal tersebut menyebabkan peningkatan nilai fluks pada jam tertentu akibat penyetingan awal pompa. Nilai fluks rata-rata dan volume permeat selama operasi berlangsung didapatkan dengan cara perhitungan seperti pada Lampiran 5. Pada Tabel 4.3 diketahui nilai fluks rata-rata tertinggi sebesar 66,78 L/m².jam terjadi pada kondisi membran M2 dengan kemiringan *spacer* 90°, sedangkan nilai fluks terendah terjadi pada kondisi membran M4 dengan kondisi kemiringan *spacer* 105° sebesar 52,81 L/m².jam.

Tabel 4.3 Pengaruh *Spacer* Terhadap Volume Permeat dan Nilai Fluks Rata-rata

<i>Spacer</i>	Nilai Fluks Rata-rata (L/m ² .jam)	Lama Operasi (jam)	Volume Permeat Rata-rata (L)
M1 (0)	62,21	90	839,79
M2 (90)	66,78	90	901,55
M3 (75)	66,31	90	895,19
M4 (105)	52,81	90	712,95

Pengukuran nilai fluks pada variasi *spacer* dilakukan secara bersama pada tekanan yang berbeda-beda. Pemberian variasi *spacer* tidak mempengaruhi lama operasi pada masing-masing membran dikarenakan pada setiap variasi *spacer* menghasilkan lama operasi yang sama. Dengan demikian, volume permeate dapat dihitung berdasarkan hasil kali nilai fluks rata-rata selama 90 jam dengan tiap luas membran. Di antara volume permeate yang dihasilkan, volume tertinggi didapatkan pada membran M2 dengan kondisi kemiringan *spacer* 90° yaitu sebesar 901,55 L. Pemberian *spacer* dengan kemiringan 90° pada kedua sisi membran mampu meningkatkan permeabilitas membran sehingga volume yang dihasilkan lebih besar. Hal ini membuktikan bahwa penambahan *spacer* telah meningkatkan perpindahan transpor massa spesi melalui membran. Dengan adanya perpindahan massa transport yang tinggi, nilai fluks menjadi lebih stabil dan konsumsi energi lebih rendah (Goh *et al.*, 2018; Mulder, 1996).

Penentuan pengaruh pemberian *spacer*, dapat dilihat melalui turbulensi pada setiap segmen membran. Turbulensi aliran pada permukaan membran dapat dihitung menggunakan bilangan Reynold (NRe). Perhitungan NRe pada membran dapat dilakukan seperti contoh berikut

NRe Membran M1

- Fluks rata-rata = 62,21 L/m².jam
= 0,000017 m³/m².detik
- Lebar membran = 0,15 meter
- Tinggi membran = 0,51 meter
- Viskositas = 0,8039 x 10⁻⁶ m²/s
- Debit rata-rata = 62,21 L/m².jam x 0,15 m² x 10⁻³ m³/L x 24 jam/hari
= 0,224 m³/hari

- Jari-jari Hidrolis (R)
$$= \frac{L \times T}{2L+2T}$$

$$= \frac{0,15 \times 0,51}{2(0,15)+2(0,51)}$$

$$= 0,058$$
- Nre
$$= \frac{V_h \times R}{v}$$

$$= \frac{0,000017 \frac{m}{detik} \times 0,065}{0,8039 \times 10^{-6}}$$

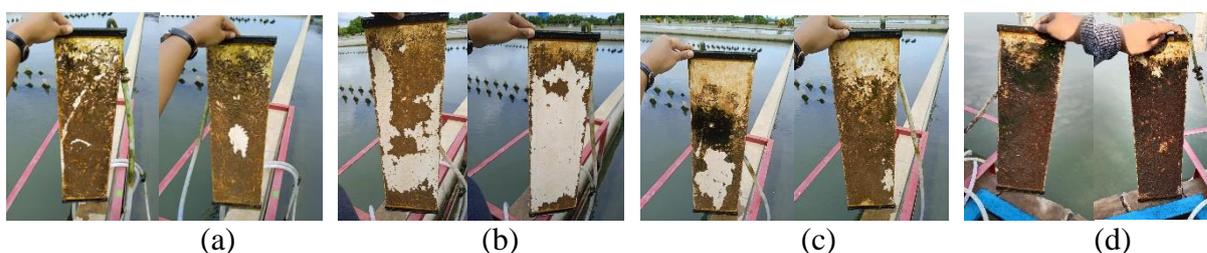
$$= 1,25$$

Dengan mengikuti contoh perhitungan seperti diatas, maka didapatkan nilai bilangan Reynold pada masing-masing kondisi variasi *spacer* pada membran seperti pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Nilai NRe Tiap Variasi *Spacer*

Kemiringan <i>Spacer</i>	Nilai NRe
M1 (tanpa <i>spacer</i>)	1,25
M2 (90°)	1,34
M3 (75°)	1,33
M4(105°)	1,06

Berdasarkan data bilangan Reynold pada masing-masing kondisi membran dapat diketahui bahwa nilai bilangan Reynold <2000 yang artinya aliran pada permukaan membran tergolong laminar. Nilai NRe tertinggi sebesar 1,34 terjadi pada kondisi membran M2 dengan kemiringan *spacer* 90°. Kemiringan *spacer* 90° mempersempit area aliran air yang melalui permukaan membran. Hal tersebut menyebabkan laju aliran meningkat sehingga terjadi golakan di permukaan membran. Adanya golakan tersebut memberikan dampak positif terhadap permeabilitas membran. Karena peningkatan laju aliran mampu mengurangi pengotoran pada permukaan membran dan mencegah terjadinya *fouling*. Oleh karena itu, permeabilitas membran meningkat dan kuantitas yang dihasilkan pada membran dengan *spacer* menjadi lebih besar (Goh *et al.*, 2018). Pengaruh pemberian *spacer* terhadap membran juga ditunjukkan berdasarkan morfologi pengotoran (deposit) yang terjadi pada membran seperti pada Gambar 4.31.



Gambar 4.31 Morfologi Pengotoran Membran (a) M1, (b) M2, (c) M3, dan (d) M4 setelah operasi

Berdasarkan hasil pengotoran pada setiap membran yang terlihat, diketahui bahwa pengotoran pada membran terjadi di kedua sisi membran. Pada membran M1 dengan kondisi tanpa *spacer* pengotoran pada membran cukup merata pada permukaan membran. Namun, ketebalan pengotorannya tergolong masih tipis pada bagian atas permukaan membran dan tebal pada bagian tengah sehingga kotoran di tengah permukaan membran mengalami peluruhan. Hal ini menandakan bahwa membran M1 masih mengalami polarisasi konsentrasi pada permukaan bagian atas dan tengah (Redjeki, 2011).

Pada membran M2 dengan kemiringan *spacer* 90° mengalami peluruhan pengotoran pada sebagian besar permukaan membran. Peluruhan ini terjadi karena tingginya perpindahan massa transport dan turbulensi aliran pada membran. Transport massa yang tinggi menyebabkan akumulasi pengotoran di permukaan membran semakin tebal sehingga jatuh karena dorongan aliran dan berat jenis partikel yang semakin berat (Mulder, 1996; Wu *et al.*, 2019). Hal ini membuktikan bahwa hasil kuantitas permeat yang tinggi pada membran M2 terjadi karena penyumbatan pada pori membran serta pengotoran di permukaan sebagian besar telah hilang, sehingga permeabilitas membran pada M2 meningkat (Goh *et al.*, 2018).

Pengotoran pada membran M3 dengan dengan kemiringan *spacer* 75° tidak terjadi secara merata. Terjadi gradasi pengotoran di permukaan membran M3 yang mana semakin ke atas, ketebalan pengotoran semakin tipis. Pada Gambar 4.31 terlihat akumulasi pengotoran pada sisi tengah membran yang sangat tebal hingga berwarna hitam dibanding bagian lainnya. Pada bagian bawah pengotoran membran telah meluruh sehingga permukaan membran terlihat bersih. Hal ini menandakan bahwa pemberian kemiringan *spacer* 75° meningkatkan transport massa dan turbulensi hanya di permukaan membran bagian bawah. Pada *spacer* bagian bawah memiliki jarak lebih dekat dibandingkan bagian atas. Oleh karena itu, laju aliran pada bagian bawah meningkat dan laju aliran pada bagian atas membran menurun. Hal tersebut menyebabkan pengotoran pada bagian atas tidak dapat dihilangkan (Goh *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2019).

Pada membran M4 dengan kemiringan *spacer* 105° pengotoran tidak terjadi secara merata. Pada bagian atas pengotoran lebih tebal dan berwarna hijau. Adanya warna tersebut mengindikasikan akumulasi makroalga pada permukaan membran yang terejeksi. Makroalga merupakan tumbuhan berklorofil yang hidup melekat pada substrat lain seperti batu, karang, lumpur, pasir dan benda keras lainnya. Makroalga mudah tumbuh pada substrat yang terus menerus terendam dalam perairan. Pertumbuhan makroalga pada bagian atas membran dipengaruhi oleh tingkat kekeruhan pada air. Hal ini dikarenakan kekeruhan menghalangi penetrasi cahaya yang dibutuhkan oleh makroalga untuk fotosintesis (Maturbongs, 2015). Penggunaan kemiringan *spacer* pada sistem membran terendam memiliki efisiensi yang tinggi terhadap penyisihan mikroalga (Razak *et al.*, 2020). Akumulasi pengotoran yang tebal pada permukaan membran membuktikan hasil kuantitas yang rendah pada membran M4 dikarenakan penyumbatan pori membran (Goh *et al.*, 2018). Aliran *cross-flow* yang berlawanan dengan arah kemiringan *spacer* akan menghambat aliran air yang datang sehingga mampu mengakumulasi deposisi partikel pada permukaan membran sehingga membran lebih kotor (Zamani *et al.*, 2017).

4.4 Analisis Pengaruh Tekanan dan *Spacer* Terbaik Terhadap Parameter Kualitas dan Kuantitas

Berdasarkan hasil analisis efluen permeat yang dilakukan pada variasi tekanan dan variasi *spacer* ditentukan tekanan dan kemiringan terbaik. Penentuan dilakukan berdasarkan parameter kualitas dan kuantitas efluen yang dihasilkan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaturan kondisi operasi yang optimal pada membran mikrofiltrasi terendam yang mampu mengurangi pengotoran membran, memperpanjang masa pakai membran, mengontrol fenomena fouling sehingga konsumsi energi lebih rendah (Goh *et al.*, 2018).

Pada variasi tekanan yang dilakukan yaitu 0,6 bar, 0,7 bar dan 0,9 bar ditentukan penyisihan kualitas dan kuantitas terbaik. Parameter kualitas ditentukan berdasarkan penyisihan pada parameter kekeruhan, TSS, zat organik, mikroplastik, total *coliform* dan *E. coli*. Parameter kuantitas ditentukan berdasarkan nilai fluks rata-rata, lama operasi dan volume permeat yang dihasilkan.

Tabel 4.5 Pengaruh Tekanan Terhadap Parameter Kualitas dan Kuantitas

Tekanan (bar)	Nilai Rejeksi (%R) Rata-rata						Nilai Fluks (L/m ² .jam)	Lama Operasi (jam)	Volume Permeat (L)
	Kekeruhan	TSS	Zat Organik	Mikroplastik	Total Coliform	<i>E. coli</i>			
0,6	93,87	97,50	36,69	61,85	99,93	100	49,78	11	82,14
0,7	94,66	96,88	24,29	62,27	100,00	100	64,33	55	530,70
0,9	96,34	28,93	25,26	81,25	99,98	100	112,42	24	404,70

Berdasarkan data Tabel 4.5 diketahui variasi tekanan tidak memberikan pengaruh yang besar terhadap parameter kualitas air yang diolah. Variasi tekanan yang diuji mempengaruhi kuantitas air yang dihasilkan. Variasi tekanan 0,6 bar menghasilkan kuantitas yang lebih rendah dibandingkan variasi lainnya. Pada tekanan 0,7 bar kuantitas bar memberikan masa pakai membran yang lebih panjang dibandingkan variasi tekanan 0,9 bar. Namun, nilai fluks yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan hasil pada tekanan 0,9 bar. Dengan demikian, variasi tekanan 0,7 bar merupakan variasi yang paling optimal karena mampu mengurangi intensitas pencucian membran dengan masa pakai yang lebih lama. Selain itu, tingkat energi untuk mencapai tekanan 0,7 bar lebih rendah sehingga mampu meminimalisir biaya operasional. Pada variasi *spacer* yang dilakukan yaitu tanpa *spacer*, kemiringan *spacer* 90°, kemiringan *spacer* 75°, dan kemiringan *spacer* 105° juga ditentukan penyisihan kualitas dan kuantitas terbaik.

Tabel 4.6 Pengaruh *Spacer* Terhadap Parameter Kualitas dan Kuantitas

<i>Spacer</i> (°)	Nilai Rejeksi (%R) Rata-rata						Nilai Fluks (L/m ² .jam)	Lama Operasi (jam)	Volume Permeat (L)
	Kekeruhan	TSS	Zat Organik	Mikroplastik	Total Coliform	<i>E. coli</i>			
M1 (0)	95,07	78,57	28,61	59,23	99,99	100,00	62,21	90	839,79
M2 (90)	95,12	64,58	28,75	84,74	99,99	100,00	66,78	90	901,55
M3 (75)	94,98	64,58	34,78	69,87	100,00	100,00	66,31	90	895,19
M4 (105)	94,65	90,00	22,85	60,00	99,90	100,00	52,81	90	712,95

Berdasarkan hasil analisis data pada Tabel 4.6 diketahui variasi *spacer* tidak memberikan pengaruh yang besar terhadap parameter kualitas. Penggunaan *spacer* memberikan pengaruh terhadap kuantitas yang dihasilkan apabila dibandingkan membran dengan konfigurasi tanpa *spacer*. Variasi *spacer* pada membran M2 memberikan pengaruh kuantitas tertinggi. Apabila dibandingkan dengan variasi lainnya, maka efisiensi membran terbaik pada variasi *spacer* M2 dengan kemiringan 90°.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan pada penelitian ini adalah:

1. Hasil kinerja *immersed membrane* mikrofiltrasi terbaik dengan pengaruh tekanan yang optimal terjadi pada tekanan 0,7 bar dengan efisiensi penyisihan pada parameter kekeruhan, TSS, zat organik, mikroplastik, total *coliform* dan *E. coli* terjadi berturut-turut yaitu 94,66%, 96,88%, 24,29%, 62,27%, 100% dan 100%. Parameter kuantitas yang dihasilkan pada tekanan 0,7 bar mencapai nilai fluks rata-rata sebesar 64,33 L/m².jam dengan lama operasi 55 jam dan volume permeate 530,70 L.
2. Kinerja *immersed membrane* mikrofiltrasi optimal dengan pengaruh pemberian *spacer* pada parameter kualitas dan kuantitas terjadi pada membran dengan kemiringan *spacer* 90°. Parameter kualitas mencapai efisiensi penyisihan kekeruhan, TSS, zat organik, mikroplastik, total *coliform* dan *E. coli* secara berturut-turut adalah 95,12%, 64,65%, 28,75%, 84,74%, 99,99% dan 100%. Parameter kuantitas yang dihasilkan dengan konfigurasi membran kemiringan 90° mencapai nilai fluks rata-rata sebesar 66,78 L/m².jam dengan lama operasi 90 jam dan volume permeate 901,55 L.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya yaitu:

1. Melakukan penelitian dengan variasi tekanan yang lebih tinggi untuk mengetahui kondisi optimum yang mampu dicapai oleh *immersed membrane*
2. Melakukan pengujian analisis sampel kualitas pada variasi waktu operasi membran untuk mengetahui stabilitas kinerja membran
3. Melakukan penelitian pengaruh dosis koagulan sebagai *pre-treatment*, pencucian, kondisi operasi atau modifikasi membran untuk mengetahui pengurangan fenomena *fouling* yang optimal
4. Menggunakan spesifikasi peralatan yang telah sesuai dengan kondisi pada lokasi implementasi

DAFTAR PUSTAKA

- Abadi, S. R. H., Sebzari, M. R., Hemati, M., Rekabdar, F., & Mohammadi, T. (2011). Ceramic membrane performance in microfiltration of oily wastewater. *Desalination*, 265(1–3), 222–228. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.07.055>
- Al-Layla, M.A. (1978). *Water Supply Engineering Design*. Michigan: Ann-Arbor Science
- Al-Shammari, S. B., Bou-Hamad, S., & Al-Tabtabaei, M. (2012). Comparative performance evaluation of microfiltration submerged and pressurized membrane treatment of wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 49(1–3), 26–33. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.708194>
- Ariyanti, D., Widiastuti, N., & Safarina, N. (2020). Kinerja Membran Plat Berpori Berbasis Selulosa Asetat yang Disintesis Secara Inversi Fasa untuk Ultrafiltrasi Bakteri E.coli di PDAM Surabaya. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 21(2), 165–173. <https://doi.org/10.29122/jtl.v21i2.3945>
- Ary, E., & Indaryanto, H. (2017). *Perancangan Unit Instalasi Pengolahan Air Minum Kampus Institut Teknologi Sepuluh Nopember*. 6(1), 1–6.
- Badan Standardisasi Nasional. (2005). Air dan air limbah – Bagian 25 : Cara uji kekeruhan dengan nefelometer. *Sni 06-6989.25-2005*, 1–9.
- Baker, R. W. (2004). *Membrane Technology and Applications*. In *Membrane Technology and Research, California* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Campinas, M., Viegas, R. M. C., Silva, C., Lucas, H., & Rosa, M. J. (2021). Operational performance and cost analysis of PAC/ceramic MF for drinking water production: Exploring treatment capacity as a new indicator for performance assessment and optimization. *Separation and Purification Technology*, 255(July 2020), 117443. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117443>
- Chen, V., Fane, A. G., Madaeni, S., & Wenten, I. G. (1997). Particle deposition during membrane filtration of colloids: Transition between concentration polarization and cake formation. *Journal of Membrane Science*, 125(1), 109–122. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(96\)00187-1](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(96)00187-1)
- Field, R. W., Wu, D., Howell, J. A., & Gupta, B. B. (1995). Critical flux concept for microfiltration fouling. *Journal of Membrane Science*, 100(3), 259–272. [https://doi.org/10.1016/0376-7388\(94\)00265-Z](https://doi.org/10.1016/0376-7388(94)00265-Z)
- Fritzmann, C., Hausmann, M., Wiese, M., Wessling, M., & Melin, T. (2013). Microstructured spacers for submerged membrane filtration systems. *Journal of Membrane Science*, 446, 189–200. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.06.033>
- Goh, P. S., Lau, W. J., Othman, M. H. D., & Ismail, A. F. (2018). Membrane fouling in desalination and its mitigation strategies. *Desalination*, 425(August 2017), 130–155. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.018>
- Gray, N. F. (2014). *Filtration Methods*. In *Microbiology of Waterborne Diseases: Microbiological Aspects and Risks: Second Edition* (Second Edi). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415846-7.00035-4>
- Guerra, K., & Pellegrino, J. (2013). Development of a Techno-Economic Model to Compare Ceramic and Polymeric Membranes. *Separation Science and Technology (Philadelphia)*, 48(1), 51–65. <https://doi.org/10.1080/01496395.2012.690808>
- Hanif, K. H., Suprijanto, J., & Pratikto, I. (2021). Identifikasi Mikroplastik di Muara Sungai Kendal, Kabupaten Kendal. *Journal of Marine Research*, 10(1), 1–6. <https://doi.org/10.14710/jmr.v9i2.26832>
- Hernaningsih, T. (2018). Aplikasi Membrane Bioreactor (Mbr) Untuk Proses Daur Ulang Air Limbah. *Jurnal Air Indonesia*, 7(2). <https://doi.org/10.29122/jai.v7i2.2410>

- Hidayah, E. N., & Karnaningroem, N. (2010). *Pengaruh Kecepatan Aliran Terhadap Pengendapan Flok Pada Proses Sedimentasi*. 2088.
- Husaeni, N., H. E. N., & C, O. H. (2016). Penurunan Konsentrasi Total Suspended Solid Pada Proses Air Bersih Menggunakan Plate Settler. *Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 4(1), 67–74.
- Judd, S. J., & Hillis, P. (2001). Optimisation of combined coagulation and microfiltration for water treatment. *Water Research*, 35(12), 2895–2904. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00586-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00586-8)
- Kasam, I., Siswoyo, E., & Agustina, R. A. (2009). Penggunaan Membran Keramik Untuk Menurunkan Bakteri E. Coli Dan Total Suspended Solid (Tss) Pada Air Permukaan. *Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan*, 1(1), 77–85. <https://doi.org/10.20885/jstl.vol1.iss1.art5>
- Kerdi, S., Qamar, A., Alpatova, A., Vrouwenvelder, J. S., & Ghaffour, N. (2020). Membrane filtration performance enhancement and biofouling mitigation using symmetric spacers with helical filaments. *Desalination*, 484(March), 114454. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114454>
- Kim, Y. C., & Elimelech, M. (2012). Adverse impact of feed channel spacers on the performance of pressure retarded osmosis. *Environmental Science and Technology*, 46(8), 4673–4681. <https://doi.org/10.1021/es3002597>
- Koyuncu, I., Sengur, R., Turken, T., Guclu, S., & Pasaoglu, M. E. (2015). Advances in water treatment by microfiltration, ultrafiltration, and nanofiltration. In *Advances in Membrane Technologies for Water Treatment: Materials, Processes and Applications* (Vol. 2019). <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-121-4.00003-4>
- Kramer, F. C., Shang, R., Rietveld, L. C., & Heijman, S. J. G. (2020). Fouling control in ceramic nanofiltration membranes during municipal sewage treatment. *Separation and Purification Technology*, 237, 116373. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116373>
- Lebeau, T., Lelièvre, C., Buisson, H., Cléret, D., Van De Venter, L. W., & Côté, P. (1998). Immersed membrane filtration for the production of drinking water: combination with PAC for NOM and SOCs removal. *Desalination*, 117(1–3), 219–231. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(98\)00101-5](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(98)00101-5)
- Lee, S. J., Dilaver, M., Park, P. K., & Kim, J. H. (2013). Comparative analysis of fouling characteristics of ceramic and polymeric microfiltration membranes using filtration models. *Journal of Membrane Science*, 432, 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.01.013>
- 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*, 726, 138560. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138560>
- 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*, 359, 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.155>
- Mahardini, N. S., & Kusuma, F. H. (2002). Pengolahan Air Baku Menjadi Air Minum Dengan Teknologi Membran Mikrofiltrasi dan Ultrafiltrasi. *PKMP*, 1(10), 1–13. http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/1207/3/PG_175_Capitulo_II.pdf
- Mahmud, R. N. (2005). Kinetika Fouling Membran Ultrafiltrasi (UF) Pada Pengolahan Air Berwarna : Pengaruh Interval dan Lamanya Pencucian Balik (Backwashing) Membran. *Info Teknik*, 6(1), 62–69.
- Malia, H. and Till, S. (2001). Membrane Bioreactors: Wastewater Treatment Applications To Achieve High Quality Effluent. (http://www.wioa.org.au/conference_papers/2001/pdf/paper8.pdf)

- Mar'atusholihah, Trihadiningrum, Y., & Radityaningrum, A. D. (2020). *Kelimpahan dan Karakteristik Mikroplastik pada IPAM Karangpilang III KOta Surabaya*. 9(2).
- Maturbongs, M. R. (2015). Pengaruh Tingkat Kekerusuhan Perairan Terhadap Komposisi Spesies Makro Algae Kaitannya dengan Proses Upwelling pada Perairan Rutong-Leahari. *Agricola*, 5(1), 274–282. <https://core.ac.uk/download/pdf/268213899.pdf>
- Maulana, L., Suprayogi, A., & Wijaya, A. P. (2020). Analisis Pengaruh Total Suspended Solid Salam Penentuan Kedalaman Laut Dangkal dengan Metode Alogaritma Van Hengel dan Spitzer. *Studi Deformasi Waduk Pendidikan Diponegoro Tahun 2019*, 9(Januari), 126–135.
- Mohammad, A. W., Teow, Y. H., Ang, W. L., Chung, Y. T., Oatley-Radcliffe, D. L., & Hilal, N. (2015). Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects. *Desalination*, 356, 226–254. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.043>
- Mueller, U., Biwer, G., & Baldauf, G. (2010). Ceramic membranes for water treatment. *Water Science and Technology: Water Supply*, 10(6), 987–994. <https://doi.org/10.2166/ws.2010.536>
- Mulder, M. (1996). Basic Principles of Membrane Technology. In *Kluwer Academic Publisher* (2nd ed.). <https://doi.org/10.3917/spec.015.0003>
- Nainggolan, R. P. (2015). Pengendalian Fouling pada Sistem Pengolahan Air Berbasis Membran. *Water*, December, 0–13. https://www.researchgate.net/publication/287643829_Pengendalian_Fouling_pada_Sistem_Pengolahan_Air_Berbasis_Membran
- Notodarmojo, S., & Deniva, A. (2004). Penurunan Zat Organik dan Kekerusuhan Menggunakan Teknologi Membran Ultrafiltrasi dengan Sistem Aliran Dead-End (Studi Kasus : Waduk Saguling, Padalarang). *ITB Journal of Sciences*, 36(1), 63–82. <https://doi.org/10.5614/itbj.sci.2004.36.1.5>
- Notodarmojo, S., Zulkarnain, T., Mayasanthi, D., & Irsyad, M. (2004). Efek Pretreatment Terhadap Pembentukan Lapisan Cake dan Struktur Membrane pada Membran Ultrafiltrasi Aliran Cross-flow dalam Pengolahan Limbah Cair Emulsi Minyak. *ITB Journal of Sciences*, 36(2), 127–144. <https://doi.org/10.5614/itbj.sci.2004.36.2.3>
- Novianto, D., Dinarianasari, Y., & Prasetyaningrum, A. (2013). PEMBUATAN REFINED CARRAGEENAN DARI RUMPUT LAUT JENIS *Euchema cottonii*. *Jurnal Teknologi Kimia Dan Industri*, 2(3), 109–114.
- Nurtsani, R. (2018). Analisis Bakteri Patogen *Escherichia coli* Pada Tiram (*Crassostrea* sp.) yang Berasal dari Perairan Laut Kecamatan Baru,” Tugas Akhir, Dept. Ilmu Kelautan, FIKP, Universitas Hasanuddin
- Oever, V.R. (2005). MBR Focus: Is Submerged Best? *Filtration and Separation*, 42(5):24–27
- Padervand, M., Lichtfouse, E., Robert, D., & Wang, C. (2020). Removal of microplastics from the environment. A review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(3), 807–828. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00983-1>
- Park, W. il, Jeong, S., Im, S. J., & Jang, A. (2020). High turbidity water treatment by ceramic microfiltration membrane: Fouling identification and process optimization. *Environmental Technology and Innovation*, 17, 100578. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100578>
- Pivokonsky, 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*, 643, 1644–1651. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.102>
- 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(October 2020), 0–4. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2020.100075>
- Pramesti, D. S., & Puspikawati, S. I. (2020). Analisis Uji Kekeuhan Air Minum Dalam Kemasan Yang Beredar Di Kabupaten Banyuwangi. *J. Kesehatan Masyarakat*, 11(2), 75–85. <http://jurnal.fkm.untad.ac.id/index.php/preventif>
- Pratiwi, K. D. S., & Hermana, J. (2014). Efisiensi Pengolahan Limbah Cair Mengandung Minyak Pelumas pada Oil Separator dengan Menggunakan Plate Settler. 3(1), 5–9. <http://ejurnal.its.ac.id/index.php/teknik/article/view/5379/1675>
- Rahmawati, R., Bilad, M. R., Laziz, A. M., Nordin, N. A. H. M., Jusoh, N., Putra, Z. A., Mahlia, T. M. I., & Jaafar, J. (2019). Finned spacer for efficient membrane fouling control in produced water filtration. *Journal of Environmental Management*, 249(July). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109359>
- Rahmawati, R., Bilad, M. R., Nawi, N. I. M., Wibisono, Y., Suhaimi, H., Shamsuddin, N., & Arahman, N. (2021). Engineered spacers for fouling mitigation in pressure driven membrane processes: Progress and projection. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106285. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106285>
- Ratnawati Nurtsani. (2018). Analisis Bakteri Patogen *Escherichia coli* Pada Tiram (*Crassostrea sp.*) Yang Berasal Dari Perairan Laut Kecamatan Barru. 1–59. http://digilib.unhas.ac.id/uploaded_files/temporary/DigitalCollection/YjMyMWVmZWZmYWRhMWNjMDE5NDU2OTU4ZjdiZTM1ZjM5N2Q4ODE3ZQ==.pdf
- Razak, N. N. A. N., Rahmawati, R., Bilad, M. R., Pratiwi, A. E., Elma, M., Nawi, N. I. M., Jaafar, J., & Lam, M. K. (2020). Finned spacer for enhancing the impact of air bubbles for membrane fouling control in *Chlorella vulgaris* filtration. *Bioresource Technology Reports*, 11(February), 100429. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100429>
- Redjeki, S. (2011). Proses Desalinasi Dengan Membran. *Proses Desalinasi Dengan Membran, Direktorat*, 215.
- Riduan, R. (2003). Analisa Pengaruh Kandungan Suspended Solid (SS) Air Baku terhadap Kinerja Membran Mikrofiltrasi. *Info-Teknik*, 4(1), 27–33.
- Said, N. I. (2018). Uji Kinerja Pengolahan Air Siap Minum Dengan Proses Biofiltrasi, Ultrafiltrasi Dan Reverse Osmosis (Ro) Dengan Air Baku Air Sungai. *Jurnal Air Indonesia*, 5(2), 144–161. <https://doi.org/10.29122/jai.v5i2.2444>
- Said, N. I., & Hartaja, D. R. K. (2018). Kondisi Kualitas Air Baku Instalasi Ngagel Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Kota Surabaya. *Jurnal Air Indonesia*, 10(2), 52–66. <https://doi.org/10.29122/jai.v10i2.3761>
- Santoso, A. D. (2018). Bahan Organik Terlarut Dalam Air Laut. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 6(2), 139–143. <https://doi.org/10.29122/jrl.v6i2.1924>
- Sowmya, S. R., Madhu, G. M., Raizada, A., & Madhusoodana, C. D. (2020). Studies on effective treatment of waste water using submerged ceramic membrane bioreactor. *Materials Today: Proceedings*, 24, 1251–1262. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.440>
- Suhendar, D. T., Sachoemar, S. I., & Zaidy, A. B. (2020). Hubungan kekeuhan terhadap Materi Partikulat Tersuspensi (MPT) dan kekeuhan terhadap klorofil dalam Tambak Udang. *Journal of Fisheries and Marine Research*, 4(3), 332–338.
- Susanto, T. (2011). Pengolahan Air PDAM Surabaya Menjadi Air Siap Minum Menggunakan GAC, Filter Pasir Silica, UV. 1–20.
- Suwari, Riani, E., Pramudya, B., & Djuwita, I. (2010). Profil Pencemaran Air Kali Surabaya dan Strategi Pengendaliannya. In *Bulitbang* (Vol. 11, Issue 2a, pp. 63–74).
- Taamneh, Y., & Bataineh, K. (2017). Improving the performance of direct contact membrane distillation utilizing spacer-filled channel. *Desalination*, 408, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.01.004>

- Tan, Y. Z., Mao, Z., Zhang, Y., Tan, W. S., Chong, T. H., Wu, B., & Chew, J. W. (2019). Enhancing fouling mitigation of submerged flat-sheet membranes by vibrating 3D-spacers. *Separation and Purification Technology*, 215, 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.12.085>
- Thomassen, J. K., Faraday, D. B. F., Underwood, B. O., & Cleaver, J. A. S. (2005). The effect of varying transmembrane pressure and crossflow velocity on the microfiltration fouling of a model beer. *Separation and Purification Technology*, 41(1), 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2004.05.002>
- Triebkorn, R., Braunbeck, T., Grummt, T., Hanslik, L., Huppertsberg, S., Jekel, M., Knepper, T. P., Kraus, S., Müller, Y. K., Pittroff, M., Ruhl, A. S., Schmiege, H., Schür, C., Strobel, C., Wagner, M., Zumbülte, N., & Köhler, H. R. (2019). Relevance of nano- and microplastics for freshwater ecosystems: A critical review. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 110, 375–392. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.11.023>
- Wang, L. K., Chen, J. P., Hung, Y.-T., & Shammas, N. K. (2011). *Membranes and Desalination Technologies*. Humana Press.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134520>
- Warsinger, D. M., Chakraborty, S., Tow, E. W., Plumlee, M. H., Bellona, C., Loutatidou, S., Karimi, L., Mikelonis, A. M., Achilli, A., Ghassemi, A., Padhye, L. P., Snyder, S. A., Curcio, S., Vecitis, C. D., Arafat, H. A., & Lienhard, J. H. (2018). A review of polymeric membranes and processes for potable water reuse. *Progress in Polymer Science*, 81, 209–237. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.01.004>
- Wenten, I., Aryanti, P., & Hakim Diktat, A. (2010). *PENGANTAR TEKNOLOGI MEMBRAN Lecture Note. September, 2017–2018*.
- Wenten, I. G. (2004). *Teknologi Membran dalam Pengolahan Air Limbah dan Industri. Studi Kasus : Pemanfaatan Ultrafiltrasi untuk Pengolahan Air Tambak. August, 1–22*.
- Wenten, I. G. (2016). *Teknologi Membran: Prospek dan Tantangannya di Indonesia*.
- Wenten, I. G., Aryanti, P. T. ., Hakim, A. N., & Khoiruddin. (2012). *Teknik Regenerasi Membran*.
- Wenten, I. G., Hakim, A. N., Khoiruddin, & Aryanti, P. T. P. (2013). *Polarisasi Konsentrasi dan Fouling pada Membran. 1–33*.
- Wu, B., Zhang, Y., Mao, Z., Tan, W. S., Tan, Y. Z., Chew, J. W., Chong, T. H., & Fane, A. G. (2019). Spacer vibration for fouling control of submerged flat sheet membranes. *Separation and Purification Technology*, 210, 719–728. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.08.062>
- 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. <https://doi.org/10.1021/es0629054>
- Yogaswara, R. B., & Moesriati, A. (2021). *Identifikasi Kendala Proses Produksi Instalasi Pengolahan Air Minum Menggunakan Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) (Studi Kasus: PDAM Tirta Cahaya Agung Kabupaten Tulungagung). 10(2)*.
- Zamani, F., Tanudjaja, H. J., Akhondi, E., Krantz, W. B., Fane, A. G., & Chew, J. W. (2017). Flow-field mitigation of membrane fouling (FMMF) via manipulation of the convective flow in cross-flow membrane applications. *Journal of Membrane Science*, 526(December 2016), 377–386. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.12.055>

LAMPIRAN 1 PROSEDUR ANALISIS PARAMETER KUALITAS AIR

- **Prosedur Analisis Total Suspended Solid (TSS)
(Metode Gravimetri)**

Sumber: SNI 06-6989.3-2004

I. Alat dan Bahan

1. Furnace (suhu 550°C)
2. Oven dengan suhu 105°C
3. Cawan porselin 50 mL
4. Timbangan analitis
5. Desikator
6. Cawan Petridis
7. Kertas saring
8. Vacuum filter

II. Prosedur Percobaan

1. Memasukkan cawan ke dalam furnace 550°C selama 1 jam, setelah itu memasukkan ke dalam oven 105°C selama 15 menit.
2. Memasukkan kertas saring dalam oven 105°C selama 1 jam.
3. Mendinginkan cawan dan kertas saring dalam desikator selama 15 menit.
4. Menimbang cawan dan kertas saring dengan timbangan analitis (e (mg)).
5. Meletakkan kertas saring yang telah ditimbang pada vacuum filter.
6. Menuangkan sampel sebanyak 25 mL di atas filter yang telah dipasang pada vacuum filter, volume sampel yang digunakan tergantung dari kepekatannya, mencatat volume sampel (g (mL)).
7. Menyaring sampel hingga kering atau airnya habis.
8. Meletakkan kertas saring pada cawan dan memasukkan ke oven selama 1 jam pada suhu 105°C.
9. Mendinginkan dalam desikator selama 15 menit.
10. Menimbang dengan timbangan analitis (f (mg)).
11. Hitung TSS dengan rumus berikut:

$$\text{Zat padat Total Tersuspensi (mg/L)} = \frac{(f-e)}{g} \times 1000 \times 1000$$

Dimana:

e = cawan kosong setelah di furnace 550°C dan dioven 105°C

f = cawan dan residu setelah dioven 105°C

g = volume sampel

- **Prosedur Analisis Zat Organik
(Metode Nilai Permanganat)**

Sumber: SNI 06-6989.22-2004

I. Alat dan Bahan

1. Larutan Asam Sulfat (H₂SO₄) yang bebas organik
2. Larutan Kalium Permanganat (KMnO₄) 0,01N
3. Larutan Asam Oksalat 0,1 N
4. Pemanas Listrik
5. Buret 25 mL atau 50 mL
6. Erlenmeyer 250 mL 1 buah

7. Gelas ukur 100 mL
8. Pipet 10 mL, 1 mL

II. Prosedur Percobaan

1. Menuangkan sampel air sebanyak 100 mL dengan gelas ukur
2. Menambahkan 2,5 mL Asam Sulfat 4N bebas organik
3. Menambahkan beberapa tetes larutan Kalium Permanganat 0,01N hingga terjadi warna merah muda
4. Memanaskan hingga mendidih selama 1 menit
5. Menambahkan 10 mL Kalium Permanganat 0,01N
6. Memanaskan hingga mendidih selama 10 menit
7. Menambahkan 1 mL Larutan Asam Oksalat 0,1N dan tunggu sampai air menjadi jernih
8. Titrasi dengan Kalium Permanganat 0,01N sampai timbul warna merah muda
9. Hitung nilai permanganate dengan menggunakan rumus berikut:

$$\text{KMnO}_4 \text{ (L)} = \frac{1000}{\text{Vol contoh}} [\{ (10 + a)xN \} - (1 \times 0,1)] \times 3,1,6x P \times 1000 \times 1000$$

• **Prosedur Analisis Nilai Kekerusuhan (Metode Turbidimetri)**

- I. Alat dan Bahan
 1. Turbidimeter
- II. Prosedur Percobaan
 1. Menyalakan power, kemudian memasukkan blanko dan *set alat* pada set zero
 2. Memasukkan sampel air ke dalam tabung
 3. Memasukkan tabung ke dalam alat
 4. Membersihkan tabung dengan tissue
 5. Mencatat angka yang dihasilkan

• **Prosedur Analisis Total Coliform dan E. coli (Metode Idexx Colilert)**

- I. Alat dan Bahan
 1. Idexx Quanti-Tray atau Quanti-Tray/2000
 2. Mesin *sealer* Quanti-Tray
 3. Lampu UV 375 mm
 4. Botol steril 100 mL
 5. Media colilert
 6. Inkubator 35°C ± 0,5°C
- II. Prosedur Percobaan
 1. Memasukkan media colilert kedalam 100 mL sampel (dalam botol steril) secara aseptis.
 2. Mengocok sampel secara perlahan hingga media colilert larut dan homogen.
 3. Menuangkan sampel yang sudah homogen kedalam fial plastik Idexx Quanti-Tray (menghitung 1-200) atau Idexx Quanti-Tray/2000 (menghitung 1-2.419) secara aseptis
 4. Kemudian siap di press dalam mesin *sealer* Quanti-Tray dengan cara menghubungkan mesin *sealer* hingga lampu merah menyala, menunggu beberapa saat hingga lampu berwarna hijau, mesin *sealer* siap digunakan.
 5. Memasukkan fial plastik yang telah berisi sampel ke dalam mesin *sealer*, menunggu hingga sampel keluar dalam kondisi telah terkemas.

6. Menginkubasi sampel yang telah dikemas dalam fial plastik dengan suhu 35°C selama 18 jam.
7. Setelah 18 jam kemudian menghitung jumlah bakteri secara visual, untuk positif total *coliform* ditunjukkan dengan warna kuning sedangkan untuk positif *Escherichia coli* ditunjukkan dengan warna pink fluorescent dibawah sinar UV.
8. Menyesuaikan hasil pengamatan tersebut dengan tabel MPN Idexx Colilert, jumlah bakteri disampaikan dalam satuan MPN/100 mL.

- **Prosedur Analisis Mikroplastik
(Metode Wet Peroxide Oxidation)**

Sumber: NOAA Microplastic Methods Manual

- I. Alat dan Bahan

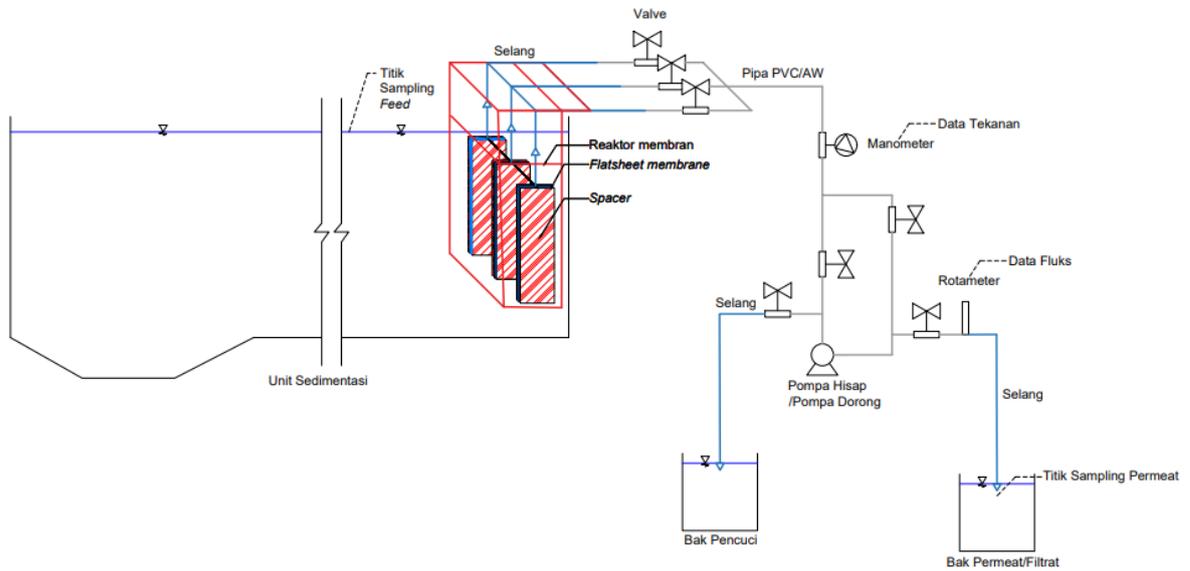
1. Larutan H₂O₂ 30%
2. Larutan Fe (II) 0,02 M
3. Membran *polytetrafluoroethylene* (PTFE) ukuran pori 0,2 µm dan diameter 47 mm.
4. Gelas beaker 1000 mL
5. *Hot magnetic stirrer* dan *stirrer bar*
6. Cawan petri
7. Mikroskop
8. *Vacuum pump*
9. *Aluminium foil*

- II. Prosedur Percobaan

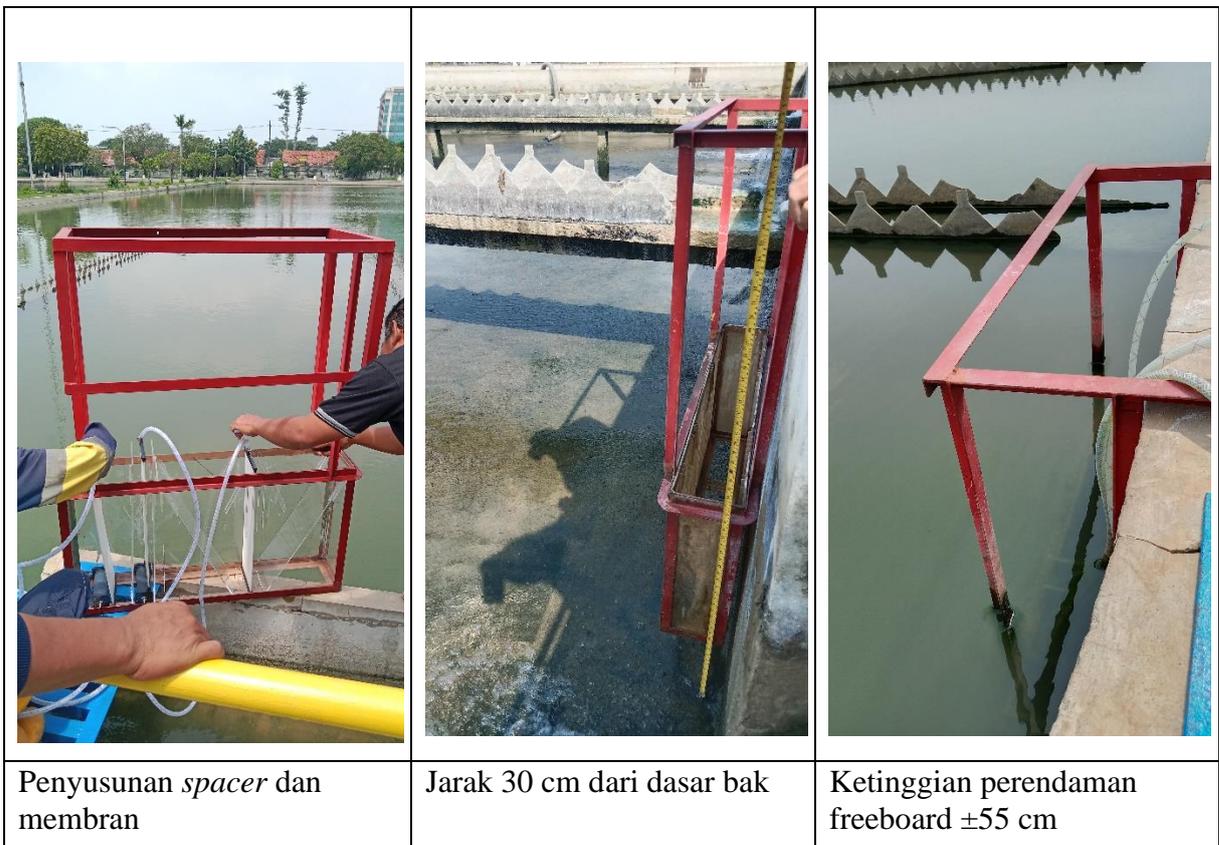
1. Memasukkan sampel 500 ml kedalam gelas beaker 1000 mL
2. Menambahkan larutan H₂O₂ 30% ke dalam gelas beaker sebanyak 10 mL
3. Menambahkan larutan Fe (II) 0,02 M ke dalam gelas beaker sebanyak 10 mL
4. Memasukkan *stirbar* ke dalam gelas beaker
5. Memanaskan larutan pada gelas beaker hingga 75° selama 30 menit
6. Menutup gelas beaker dengan aluminium foil dan didiamkan hingga mengendap
7. Menyaring larutan dengan menggunakan membran PTFE dan *vacuum pump*
8. Membran filter diletakkan pada cawan petri hingga kering
9. Mengamati membran filter dengan mikroskop
10. Menghitung jumlah partikel mikroplastik yang tersaring

LAMPIRAN 2 PERANCANGAN REAKTOR

A. Skema Reaktor



B. Reaktor Membran Terendam



C. Reaktor Membran Tidak terendam



Reaktor Membran Tidak Terendam



Valve menuju membran

LAMPIRAN 3
SPESIFIKASI PERALATAN

No.	Peralatan dan Bahan	Jumlah	Fungsi
1	Membrane Mikrofiltrasi	4 sheets	Untuk memisahkan koloid tersuspensi dan partikel dengan ukuran 0,05-10 um
	Konfigurasi	Flat-sheet	
	Model	PCFM-A-50-3-U	
	Ukuran Pori	0,05 µm	
	Dimensi	150 x 510 x 4 mm	
	Luas Membran	0,15 m ²	
	Material	α-Al ₂ O ₃ (ceramic)	
	Berat	0,44 Kg	
	Tekanan Maksimum	0,3 MPa	
	Filtrasi	Tekanan hisap negatif	
	Flux Air Bersih	20 m ³ /hari	
	Produsen	Jiangxi Dasen Tech. Co., Ltd.	
2	Spacer	6 sheets	Untuk mencegah fouling dan menjaga fluks membran
	Jenis	Plat 1D	
	Material	Akrilik	
	Dimensi	150 x 510 x 3 mm	
	Morfologi	Simetris	
3	Pompa	1 unit	Untuk menghisap dan memompakan air pada membran
	Jenis	Moswell Aqua Jet 100	
	Head hisap	11 m	
	Head dorong	34 m	
	Ukuran Discharge	1 inch	
4	Rotameter	1 buah	Untuk mengukur laju aliran produk filtrat
	Merk	Filtrotech	
	Dimensi	17,5 x 3 x 3,3 cm	
	Kapasitas	7 L/menit	
5	Manometer	1 buah	Untuk mengukur tekanan operasi
	Merk	Wiebrock	
	Dimensi	2 ½ inchi	
	Kapasitas	-1 – 3 bar	
8	Bak Filtrat	2 buah	Untuk menampung hasil filtrasi
9	Valve	3 buah	Untuk mengurangi tekanan aliran pada pipa
10	Water mur	6 buah	
11	Pipa PVC	4 m	
12	Selang benang + biasa	14,5 m	

LAMPIRAN 4
PROSEDUR PENGOPRASIAN MEMBRAN DAN PENGAMBILAN DATA

A. Prosedur Pengoprasian Membran

No	Kegiatan	Pelaksanaan
1	Mempersiapkan modul membran flat-sheet serta <i>spacer</i> nya	Mulai
2	Memasang modul membran ke dalam bak sedimentasi secara terendam dengan posisi permukaan membran searah dengan aliran air	2
3	Menghubungkan pompa dengan sumber listrik dalam kondisi <i>off</i>	3
4	Menghidupkan pompa hisap dan melakukan <i>start-up</i> awal tekanan hingga konstan	4
5	mengamati kondisi fluks setiap jam dan mencatat waktu operasi menggunakan <i>timer</i>	5
6	Mengambil sampel air setelah operasi pada outlet reaktor	6
7	Mengambil sampel <i>feed</i> pada lokasi sampling unit sedimentasi	7
8	Mematikan pompa ketika terjadi penurunan fluks secara signifikan	8
9	Mengulang kembali langkah 3-8 pada setiap kondisi percobaan	9
10	Melakukan pencucian membran dengan memompakan air pencuci menuju membran	10
11	Mengeluarkan modul membran dari unit sedimentasi	Selesai

B. Urutan Pengambilan Data

Running	Komponen	Membran				Kegiatan
		Tanpa Spacer	90°	75°	105°	
1	Tekanan hisap	0,9 bar	0,9 bar	0,9 bar	-	Pencatatan flux, lama operasi, volume filtrat, pengambilan sampel kualitas <i>feed</i> dan filtrat
2	Tekanan hisap	0,7 bar	0,7 bar	0,7 bar	-	Pencatatan flux, lama operasi, volume filtrat,

<i>Running</i>	Komponen	Membran				Kegiatan
		Tanpa <i>Spacer</i>	90°	75°	105°	
						pengambilan sampel kualitas <i>feed</i> dan filtrat
3	Tekanan hisap	0,6 bar	0,6 bar	0,6 bar	-	Pencatatan flux, lama operasi, volume filtrat, pengambilan sampel kualitas <i>feed</i> dan filtrat
4	Tekanan hisap	-	-	-	0,9 bar	Pencatatan flux, lama operasi, volume filtrat, pengambilan sampel kualitas <i>feed</i> dan filtrat
5	Tekanan hisap	-	-	-	0,7 bar	Pencatatan flux, lama operasi, volume filtrat, pengambilan sampel kualitas <i>feed</i> dan filtrat
6	Tekanan hisap	-	-	-	0,6 bar	Pencatatan flux, lama operasi, volume filtrat, pengambilan sampel kualitas <i>feed</i> dan filtrat

LAMPIRAN 5 CARA PERHITUNGAN NILAI FLUKS (J)

A. Cara Perhitungan Nilai Fluks (J)

Secara matematis fluks dirumuskan sebagai berikut:

$$J = \frac{V}{A \times t}$$

Dimana :

- J = Fluks (l/m².jam)
- V = Volume Permeat (mL)
- A = Luas Permukaan membran (m²)
- t = Waktu (jam)

Contoh

Nilai fluks pada membran M1 tekanan -0,9 bar jam ke-1 sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Debit membran} &= 320 \text{ ml/menit} \\ \text{Luas permukaan (A)} &= 0,15 \text{ m} \times 0,51 \text{ m} \times 2 \\ &= 0,15 \text{ m}^2 \\ \text{Nilai Fluks} &= \frac{V}{A \times t} \\ &= \frac{320 \text{ ml} \times 10^{-3} \frac{\text{L}}{\text{ml}} \times 60 \text{ menit/jam}}{0,15 \text{ m}^2 \times 1 \text{ menit}} \\ &= 128 \text{ L/m}^2 \cdot \text{jam} \end{aligned}$$

B. Cara Perhitungan Nilai Koefisien Rejeksi (%R)

Secara matematis nilai koefisien rejeksi (%R) dirumuskan sebagai berikut:

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_f} \times 100\%$$

Dimana:

- R = Koefisien Rejeksi (%)
- C_p = Konsentrasi zat terlarut dalam permeat
- C_f = Konsentrasi zat terlarut dalam umpan

Contoh

Nilai Koefisien Rejeksi (%R) parameter nilai kekeruhan pada membran M1 dengan tekanan - 0,9 bar sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Konsentrasi kekeruhan pada permeat (Cp)} &= 0,41 \text{ NTU} \\ \text{Konsentrasi kekeruhan pada feed (Cf)} &= 10,45 \text{ NTU} \\ \text{Nilai Koefisien Rejeksi (%R)} &= 1 - \frac{C_p}{C_f} \times 100\% \\ &= 1 - \frac{0,41}{10,45} \times 100\% \\ &= 96,08\% \end{aligned}$$

C. Cara Perhitungan Nilai Fluks Rata-rata

Nilai rata-rata fluks membran selama operasi dapat dihitung dengan rumus

$$J \text{ rata-rata} = \frac{\sum J \text{ setiap jam}}{\text{Lama operasi}}$$

Contoh

Nilai fluks rata-rata membran M1 pada kondisi tekanan -0,6 bar

Jumlah Fluks selama operasi = 548 L/m²

Lama operasi = 11 jam

$$\begin{aligned}
 \text{Nilai fluks rata-rata} &= \frac{\sum J \text{ setiap jam}}{\text{Lama operasi}} \\
 &= \frac{548 \text{ L/m}^2}{11 \text{ jam}} \\
 &= 49,78 \text{ L/m}^2 \cdot \text{jam}
 \end{aligned}$$

D. Volume Permeat

Volume permeat merupakan volume total efluen yang dihasilkan membran selama operasi berlangsung. Volume permeat dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$\text{Volume permeat} = \text{Fluks rata-rata} \times \text{lama operasi} \times \text{Luas Membran}$$

Contoh

Volume permeat pada membran M1 dengan kondisi tekanan -0,6 bar

$$\text{Nilai fluks rata-rata} = 49,78 \text{ L/m}^2 \cdot \text{jam}$$

$$\text{Lama operasi} = 11 \text{ jam}$$

$$\text{Luas membran} = 0,15 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned}
 \text{Volume permeat} &= 49,78 \text{ L/m}^2 \cdot \text{jam} \times 11 \text{ jam} \times 0,15 \text{ m}^2 \\
 &= 82,14 \text{ L}
 \end{aligned}$$

LAMPIRAN 6
HASIL UJI PARAMETER KUALITAS AIR

Hasil Uji Parameter Nilai Kekeruhan terhadap Variasi Tekanan dan *Spacer*

Tekanan (bar)	Feed (NTU)		Nilai Kekeruhan Rata-rata (NTU)				Rata-rata (NTU)	Baku Mutu* (NTU)
	M1, M2, M3	M4	M1	M2	M3	M4		
0,6	5,64	7,91	0,34	0,34	0,34	0,51	0,38	5
0,7	10,43	7,61	0,51	0,51	0,59	0,46	0,51	5
0,9	10,45	10,70	0,41	0,39	0,36	0,39	0,39	5

Hasil Uji Parameter TSS terhadap Variasi Tekanan dan *Spacer*

Tekanan (bar)	Feed (mg/L)		TSS Rata-rata (mg/L)				Rata-rata (mg/L)	Baku Mutu* (mg/L)
	M1, M2, M3	M4	M1	M2	M3	M4		
0,6	2,00	5,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,13	-
0,7	8,00	19,00	0,00	0,50	0,50	0,00	0,25	-
0,9	7,00	22,50	4,50	7,00	7,90	4,50	5,98	-

Hasil Uji Parameter Zat Organik terhadap Variasi Tekanan dan *Spacer*

Tekanan (bar)	Feed (mg/L)		Zat Organik Rata-rata (mg/L)				Rata-rata (mg/L)	Baku Mutu* (mg/L)
	M1, M2, M3	M4	M1	M2	M3	M4		
0,6	21,33	13,75	13,90	12,80	11,38	10,27	12,09	10
0,7	20,38	11,69	16,12	16,91	15,48	7,58	14,02	10
0,9	17,85	13,59	12,48	12,64	11,85	12,48	12,36	10

Hasil Uji Parameter Mikroplastik terhadap Variasi Tekanan dan *Spacer*

Tekanan (bar)	Feed (Partikel/500mL)		Mikroplastik Rata-rata (Partikel/500mL)				Rata-rata (Partikel/500mL)	Baku Mutu* (Partikel/500mL)
	M1, M2, M3	M4	M1	M2	M3	M4		
0,6	27,00	5,00	5,00	5,00	15,00	3,00	7,00	-
0,7	11,00	13,00	5,00	3,00	2,00	3,00	3,25	-
0,9	12,00	5,00	7,00	0,00	2,00	0,00	2,25	-

Hasil Uji Parameter Total Coliform terhadap Variasi Tekanan dan *Spacer*

Tekanan (bar)	Feed (MPN/100mL)		Total Coliform Rata-rata (MPN/100mL)				Rata-rata (MPN/100mL)	Baku Mutu* (MPN/100mL)
	M1, M2, M3	M4	M1	M2	M3	M4		
0,6	20460,00	24195,00	0,00	0,00	0,00	72,20	18,05	0
0,7	17200,00	24195,00	1,00	0,00	0,00	3,10	1,03	0
0,9	32820,00	5200,00	7,40	12,20	2,00	0,00	5,40	0

Hasil Uji Parameter *E. coli* terhadap Variasi Tekanan dan *Spacer*

Tekanan (bar)	Feed (MPN/100mL)		<i>E. coli</i> Rata-rata (MPN/100mL)				Rata-rata (MPN/100mL)	Baku Mutu* (MPN/100mL)
	M1, M2, M3	M4	M1	M2	M3	M4		
0,6	1340,00	517,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
0,7	410,00	24195,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
0,9	2310,00	310,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0



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

UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2021/2022

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)
No. Revisi: 01

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

Hari, tanggal : Jumat, 8 Juli 2022
Pukul : 14.15-15.30 WIB
Lokasi : TL-101
Judul : Pengaruh Tekanan dan Spacer terhadap Kinerja Immersed Membrane Mikrofiltrasi
Nama : Inayah Agustina
NRP. : 0321184000092
Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1.	Perbaiki Abstrak
2.	Perbaiki semua gambar
3.	Keamanan tidak perlu diteliti negatif.
4.	Pengelasan ukuran mikroplastik yg ada di effluent membrane, bukan warnanya. Jelaskan, bila ukurannya lebih > daripada ukuran pori MF ^{bagi} membran.
5.	Kelapa pada 7 bar, membran mampu beroperasi optimal sampai 55 jam? Jelaskan.

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 Adhi Yuniarto, ST., MT., PhD

Dosen Pembimbing Ir. Bowo Djoko Marsono, Meng



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

UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2021/2022

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)
No. Revisi: 01

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

Hari, tanggal : Jumat, 8 Juli 2022
Pukul : 14.15-15.30 WIB
Lokasi : TL-101
Judul : Pengaruh Tekanan dan Spacer terhadap Kinerja Immersed Membrane Mikrofiltrasi

Nama : Inayah Agustina
NRP. : 0321184000092
Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1	Diagram penelitian → . Existing } apa? . Ideal }
2	Satuan b. organik mg/L $KMnO_4$

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 esistensi kepada Dosen Penguji
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji

Dr. Ali Masduqi, ST., MT

Dosen Pembimbing

Ir. Bowo Djoko Marsono, Meng

(Handwritten signatures)



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

UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2021/2022

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)
No. Revisi: 01

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

Hari, tanggal : Jumat, 8 Juli 2022
Pukul : 14.15-15.30 WIB
Lokasi : TL-101
Judul : Pengaruh Tekanan dan Spacer terhadap Kinerja Immersed Membrane Mikrofiltrasi
Nama : Inayah Agustina
NRP. : 0321184000092
Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1.	Perbaiki tata cara penulisan singkatan (Bab 1)
2.	Perbaiki plot grafik (angka bertumpuk; kurang terbaca jelas)
3.	Gambar 4.31 dipadukan tabel saja
4.	Abstrak diperbaiki

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 : Ainul Firdatun Nisaa, ST, MSc

Dosen Pembimbing : Ir. Bowo Djoko Marsono, Meng

(*[Signature]*)
(*[Signature]*)



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

UTA-S1-TL-02 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2021/2022

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)
No. Revisi: 01

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

Hari, tanggal : Jumat, 8 Juli 2022
Pukul : 14.15-15.30 WIB
Lokasi : TL-101
Judul : Pengaruh Tekanan dan Spacer terhadap Kinerja Immersed Membrane Mikrofiltrasi

Nilai TOEFL 480

Nama : Inayah Agustina
NRP. : 0321184000092
Topik : Penelitian

Tanda Tangan

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Ujian Tugas Akhir
1.	tambahkan penjelasan kenapa mikroplastik bisa difiltrasi dengan kemungkinan bentuk mikroplastik serat dengan diameter \leq pori membran.
2.	tambahkan operasi membran kapang diheutik fiber

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
Ir. Bowo Djoko Marsono, Meng



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

FORM FTA-03

KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : Inayah Agustina
NRP : 0321184000092
Judul : Pengaruh Tekanan dan *Spacer* Terhadap Kinerja *Immersed Membrane* Mikrofiltrasi

No	Tanggal	Keterangan Kegiatan / Pembahasan	Paraf
1	14/09/2021	Asistensi judul, persiapan peralatan dan surat izin	bf
2	11/10/2021	Tabulasi penelitian terdahulu, penulisan proposal, pemesanan membran	bf
3	24/10/2021	Diskusi variasi penelitian, reaktor membran, metode sampling	bf
4	19/11/2021	Diskusi urutan operasi membran	bf
5	16/12/2021	Diskusi perizinan, pelaksanaan penelitian dan peralatan membran	bf
6	28/12/2021	Diskusi pelaksanaan penelitian membran	bf
7	7/01/2022	Diskusi hasil orientasi lapangan	bf
8	15/01/2022	Perbaikan tahapan operasi membran dan RAB	bf
9	3/01/2022	Pengecekan reaktor membran terendam	bf
10	7/02/2022	Diskusi peralatan dan perbaikan revisi proposal	bf
11	4/03/2022	Perbaikan sekat reaktor membran	bf
12	10/03/2022	Uji coba membran secara terendam	bf
13	17/03/2022	Perbaikan reaktor membran untuk 3 sheets	bf
14	30/03/2022	Instalasi reaktor membran di PDAM dan uji coba operasi membran	bf
15	4/04/2022	Perbaikan tahap operasi tekanan membran dan pengumpulan data sampel	bf
16	13/04/2022	Diskusi perubahan rangkaian reaktor membran	bf
17	14/05/2022	Perbaikan grafik, dan tabulasi laporan TA	bf
18	17/05/2022	Diskusi pelaksanaan operasi dan hasil kuantitas	bf
19	13/06/2022	Pembahasan hasil kualitas membran	bf
20	20/06/2022	Perbaikan pembahasan pompa, grafik dan tabel perhitungan Nre spacer, kesimpulan	bf
21	8/07/2022	Perbaikan abstrak, grafik, penulisan singkatan pembahasan mikroplastik	bf

Surabaya, 26 Juli 2022
 Dosen Pembimbing

Bowo Marsono

(Ir. Bowo Djoko Marsono, M. Eng)

BIOGRAFI PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Inayah Agustina. Penulis lahir di Surabaya pada tanggal 3 Agustus 2000. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Negeri Margorejo I Surabaya, SMP Negeri 12 Surabaya dan SMA Negeri 16 Surabaya. Pada Tahun 2018 penulis melanjutkan studi sarjananya di Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan, ITS dengan NRP 03211840000092. Pada masa perkuliahan penulis ikut serta dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan sebagai asisten bidang *Social Dedication* Divisi Sosial Masyarakat. Penulis juga menjadi asisten laboratorium untuk mata kuliah Teknologi Remediasi Lingkungan dan Unit Proses Teknik Lingkungan. Berbagai pelatihan, kegiatan kepanitian yang diselenggarakan pihak luar maupun ITS telah diikuti penulis sebagai pengembangan diri. Penulis juga mengikuti kerja praktik di Perusahaan Gas Negara Tbk. Melalui tugas akhir ini, penulis mendapatkan relasi dan pengalaman baru selama 4 bulan di Instalasi Pengolahan Air Minum PDAM Ngagel III Surabaya. Apabila ada kritik dan saran mengenai tugas akhir yang ingin disampaikan pada penulis dapat melalui email Inaagustina12@gmail.com